

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Desarrollo de la Técnica LIDAR para cuantificación de Dióxido de Azufre emitido por barcos en el Puerto de Cartagena

Titulación: Máster en Ingeniería
Ambiental y de Procesos
Químicos y Biotecnológicos

Intensificación: Ingeniería Ambiental

Alumno/a: Ismael Sánchez López

Director/a/s: José María Moreno Grau

Cartagena, 7 de Octubre de 2013

TRABAJO FIN DE MÁSTER:

**DESARROLLO DE LA TÉCNICA LIDAR
PARA CUANTIFICACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE
EMITIDO POR BARCOS EN EL
PUERTO CARTAGENA**



**Ingeniería Ambiental y de Procesos Químicos y Biotecnológicos
Universidad Politécnica de Cartagena.**

TUTOR: JOSÉ MARÍA MORENO GRAU

ELABORADO POR: ISMAEL SÁNCHEZ LÓPEZ

Índice

1. INTRODUCCIÓN *pag. 5*

- 1.1. CONTEXTO DEL TRABAJO *pag. 5*
- 1.2. ACTIVIDAD PORTUARIA DE CARTAGENA *pag. 5*
- 1.3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO *pag. 6*
 - 1.3.1. Motivación *pag. 6*
 - 1.3.2. ¿Por qué el Dióxido de Azufre? *pag. 11*
 - 1.3.3. Objetivos *pag. 13*

2. MARCO METODOLÓGICO *pag. 14*

- 2.1. INTRODUCCIÓN *pag. 14*
- 2.2. LIDAR *pag. 14*
 - 2.2.1. Antecedentes *pag. 14*
 - 2.2.2. Características LIDAR *pag. 16*
 - 2.2.3. Tipos de LIDAR *pag. 19*
- 2.3. EL MÉTODO LIDAR *pag. 21*
 - 2.3.1. Principio LIDAR *pag. 21*
 - 2.3.2. La ecuación LIDAR *pag. 23*
- 2.4. DIFFERENTIAL ABSORPTION LIDAR (DIAL) *pag. 24*
- 2.5. OTRAS TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN *pag. 27*

3. EQUIPO LIDAR DIAL UPCT *pag. 29*

- 3.1. INTRODUCCIÓN *pag. 29*
- 3.2. CAMPOS DE APLICACIÓN DEL LIDAR UV11 *pag. 29*
- 3.3. SELECCIÓN DE LONGITUDES DE ONDA *pag. 30*
- 3.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA *pag. 31*
 - 3.4.1. El concepto *pag. 31*
 - 3.4.2. El sistema externo *pag. 36*
 - 3.4.3. El sistema interno *pag. 38*
 - 3.4.4. Puesta en marcha del Lidar (Conexión) *pag. 39*
 - 3.4.5. Descripción del Periscopio *pag. 42*
- 3.5. CONTROL DE SOFTWARE *pag. 45*
 - 3.5.1. Menú Principal Software *pag. 45*
 - 3.5.2. Control del Láser *pag. 46*
 - 3.5.3. Control de motores *pag. 48*
 - 3.5.4. GPS y Brújula *pag. 50*
 - 3.5.5. Control de longitudes de onda *pag. 53*
- 3.6. PUESTA EN MARCHA DEL LÁSER *pag. 60*
- 3.7. PROCEDIMIENTO DE ALINEACIÓN DEL LÁSER *pag. 63*
- 3.8. PROCEDIMIENTO DE ALINEACIÓN DEL OPO *pag. 64*
- 3.9. PROCEDIMIENTO DE ALINEACIÓN DEL CONVERTOR *pag. 65*
- 3.10. MANTENIMIENTO DE LOS TORNILLOS MOTORES-MICROMÉTRICOS. *pag. 67*

4. CONCLUSIONES SOBRE EL USO DE LA TÉCNICA LIDAR DIAL *pag. 68*

5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN *pag. 71*

6. BIBLIOGRAFÍA *pag. 72*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO DEL TRABAJO

El concepto de contaminación atmosférica se refiere a la transmisión y difusión de humos o gases tóxicos a medios como la atmósfera o el agua, como también a la presencia de polvos y gérmenes microbianos provenientes de los desechos de la actividad del ser humano.

En la actualidad, el resultado del desarrollo y progreso tecnológico ha originado diversas formas de contaminación, las cuales alteran el equilibrio físico y mental del ser humano. Debido a esto, la actual contaminación se convierte en un problema más crítico que en épocas pasadas.

En las ciudades industrializadas, como es el caso de la ciudad de Cartagena, la contaminación del aire, a parte de las fuentes comunes como en casi todas las ciudades de tipo industrial, proviene de los escapes de gases de motores de explosión, a los aparatos domésticos de calefacción, a la propia actividad industrial, al tráfico rodado de vehículos, pero también y en gran medida a la actividad portuaria, donde tiene lugar un gran tránsito de buques con distintos fines que da lugar a la emisión de gran cantidad de contaminantes ya sea en forma de gases, vapores o partículas sólidas capaces de mantenerse en suspensión, con valores superiores a los normales. Una atmósfera contaminada puede dañar la salud de las personas y afectar a la vida de las plantas y los animales. Pero además, los cambios que se producen en la composición química de la atmósfera pueden cambiar el clima, producir lluvia ácida o destruir el ozono, fenómenos todos ellos, de una gran importancia local y global. Por esto, se entiende la urgencia de conocer bien estos procesos y de tomar las medidas necesarias para que no se produzcan situaciones graves para la vida de la humanidad y de toda la biosfera.

1.2. ACTIVIDAD PORTUARIA DE CARTAGENA

En Cartagena, situada en el eje de las grandes rutas marítimas del Mediterráneo, se pueden encontrar dos instalaciones portuarias, las dársena de Cartagena y de Escombreras, ambas conectadas con la red española de autovías y ferrocarriles, y gestionadas por la Autoridad Portuaria de Cartagena.

La dársena de Cartagena se dedica a los tráficos limpios con 3 diferentes terminales: contenedores, mercancía general y cruceros.

La dársena de Escombreras se dedica a tráficos industriales con terminales para grandes líquidos y sólidos.

DATOS INFORMATIVOS		Ubicación geográfica del puerto	
	CARTAGENA		
LONGITUD	0° 59' W		
LATITUD	37° 35' N		
	Dársena de Cartagena	Dársena de Escombreras	Datos de acceso al puerto
ANCHO CANAL	-	-	
CALADO CANAL	-	-	
ANCHO BOCA	250 m	1100 m	
CALADO BOCA	11,5 m	25 m	
Metros lineales de muelles y calados 13.040 m		Superficie de almacenamiento 2.188.516 m ²	
Almacenes cubiertos 2.400 m ²		Almacenes refrigerados 47.700 m ²	
TIPOS DE MERCANCIAS Graneles líquidos (principalmente petróleo crudo, gas natural y gas y fuel oil), representando mas del 70% del trafico total del Puertos. Los graneles sólidos representan casi el 20% del total (sobre todo cemento, cereales y harinas) y finalmente la Mercancía general abarca el restante trafico total, destacando los productos siderúrgicos y químicos.			

Fuente: Página Web Autoridad Portuaria de Cartagena.

Además de ser un puerto comercial durante toda su historia, también ha estado ligado al ejército creándose un Arsenal Militar que sigue estando en activo, además de ser la sede de submarinos de la Marina Española.

Actualmente es uno de los mayores puertos comerciales e industriales de España gracias a su dársena de Escombreras, además de comenzar a despuntar en el mercado de los cruceros de placer, esta vez gracias a la dársena de Cartagena.

1.3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

1.3.1. Motivación

Las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera producidas por el tráfico de los buques mercantes están infravaloradas. Diversos estudios recientes apoyarían esta información, al ofrecer datos concretos sobre la cantidad de gases emitidos y su impacto en el medio ambiente y la salud.

Una investigación publicada en la revista científica Environmental Science and Technology, concluye que si la flota mundial no adopta los nuevos estándares de bajas emisiones de azufre, podrían morir unas 87.000 personas cada año. El estudio es la continuación de otro publicado en 2007 por los mismos autores, en el que se

afirmaba que 60.000 personas fallecieron prematuramente en 2002 debido a la elevada utilización de azufre en el combustible para uso marino.

Por su parte, una investigación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de EEUU, concluye que los gases tóxicos emitidos por los 90.000 buques mercantes mundiales provocan 60.000 muertes al año sólo en EEUU y un gasto en atención sanitaria de 230.000 millones de euros por problemas cardiorrespiratorios.

Si bien la legislación medioambiental para reducir la contaminación de los vehículos terrestres es cada vez más estricta, no lo es tanto para la producida por el tráfico marino. Este tipo de polución también es considerable: se estima que sólo los 15 buques más grandes del mundo emiten tanta polución como los 760 millones de coches que hay en el planeta. Un gran barco contenedor puede emitir la misma cantidad de sustancias químicas cancerígenas y causantes de asma que 50 millones de coches.

Podemos observar en la Tabla 1 como cerca del 50% del total de las emisiones procedentes del tráfico marítimo se generan en el Mediterráneo.

ÁREA	CO ₂	SO ₂	NO _x	HC	PM _{total}
Mar del Norte	29664	496	693	25	59
Mar Negro	3721	62	86	3	7
Mar Mediterráneo	75484	1251	1781	61	151
Mar Báltico	12727	212	299	10	24
NE Atlántico	31109	522	764	26	67
Total	152705	2543	3623	125	308

Tabla 1: Emisiones procedentes de barcos de más de 500 toneladas de *Registro Bruto (*Arqueo: modo de medir los buques en función de su volumetría) en el año 2000 en Kilotons/año.

Para la obtención de las toneladas métricas de contaminante emitido por los barcos, hay que tener en cuenta una serie de parámetros:

1. El tiempo que el barco permanece en la zona de estudio (h).

Normalmente se dispone de un sistema que pueda detectar la entrada y salida de la zona de cada barco en concreto. Sin embargo, a veces se dispone solamente de un registro a la entrada en la zona, siendo la velocidad real del barco la que define el tiempo de permanencia en la zona, tomándose como constante la velocidad de entrada.

2. La potencia total del buque durante el tiempo de permanencia en la zona (KW).

Se trata de calcular la potencia total desarrollada por todos los motores de cada barco, es decir tanto de los motores principales como de los auxiliares durante el tiempo que permanezca el barco navegando dentro de la zona de estudio.

3. El factor de carga. Potencia máxima / Potencia real.

Una vez identificado el barco, se recaban datos sobre el tipo de motor, potencia y velocidad máxima, y sobre valores de rumbo y velocidad.

$$\text{Potencial real} = \text{Potencia máxima} * \text{Factor de carga}$$

Los factores de carga (FC) para cada máquina principal se calculan directamente de la curva de la hélice de la siguiente manera:

$$\text{FC} = (\text{Veloc. Real} / \text{Veloc. Máxima})^3$$

Aplicando el valor del factor de carga a principales, se obtiene la potencia real desarrollada por el motor del barco.

4. Factor de emisión (g/kW*h).

Tipo de máquina	NO _x	CO	CO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂
Diesel lento	18,1	1,40	620,62	1,4	1,3	10,29
Diesel velocidad media	14,0	1,10	668,36	1,4	1,3	11,09
Turbina de vapor	2,1	0,20	970,71	1,5	1,4	16,10
Turbina de gas	6,1	0,20	970,71	1,5	1,4	16,10
Tipo de combustible	NO _x	CO	CO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂
RM (combustible residual)	14,7	1,10	668,36	1,4	1,3	11,09
MDO (diésel marino)	13,9	1,10	668,36	0,6	0,55	6,16

Tabla 2: En la parte superior, podemos ver los factores de emisión por cada contaminante y tipo de motor propulsor (g/KW.h), y en la inferior se observan los factores de corrección para cada tipo de máquina. Fuente: ENTEC.

Ejemplo 1: Se tiene un barco de carga general en navegación cuyo registro nos da una velocidad de 15,5 nudos para un recorrido de 31 millas. Los motores principales utilizan RM (combustible residual) y los auxiliares MDO (diésel marino).

1. Identificación en bases de datos: $P_{t\text{máx}} = 7944\text{kW}$ y $V_{\text{máx}} = 18\text{nudos}$.
2. Tiempo que permanece en la zona de estudio = 2 horas.
3. Aplicando el factor de carga para motores principales, se obtiene una potencia de 5072,4 kW.
4. Dado el tipo de barco, la potencia de los motores auxiliares supone el 11% de los motores principales, 873,8kW.
5. Aplicando los factores de emisión anteriormente descritos y suponiendo que está operando en ZVR se obtienen los siguientes resultados para Dióxido de Azufre:

Motores principales = 104,38kg de SO_2

Motores auxiliares = 6,868kg de SO_2

Se calcula que en el mundo hay unos 90.000 barcos cargueros oceánicos, que son responsables de entre el 18% y el 30% de todas las emisiones mundiales óxidos de nitrógeno (NO_x) y del 9% de las de óxidos de azufre (SO_x). El combustible utilizado en estos grandes barcos contiene dos mil veces el azufre de los combustibles diésel de los automóviles estadounidenses y europeos.

Su impacto en el cambio climático tampoco es desdeñable: se estima que de ellos parten el 3,5% y el 4% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero.

Lo peor para el medio ambiente en lo que se refiere a la contaminación proveniente de los grandes barcos es el tipo de fuel que usan. Básicamente es petróleo de descarte, lo que ha quedado del proceso de refinado del crudo. Es algo muy parecido a lo que luego se convierte en asfalto. Es el combustible más barato y más contaminante.

Por todo ello, el transporte por mar puede considerarse como el más contaminante del mundo. Si los 760 millones de coches del mundo emiten a día de hoy 78.599 toneladas de óxidos de azufre anualmente, los 90.000 barcos son responsables de 20 millones de toneladas. Es decir, 260 veces más.

Hay contradicciones en cuanto a la cuantificación del consumo de combustible en el transporte marítimo mundial;

Según distintas fuentes, en el año 2007 el consumo de combustible en Millones de Toneladas (Mt), fue el siguiente:

- IMO (International Maritime Organisation) => 369Mt.
- EIA (U.S. Energy Information Administration) => 206Mt.
- EPA (US Environmental Protection Agency) => 340Mt.

Entre el 80-90% del volumen de mercancías en el mundo utilizan el transporte por barco, por lo que esto se traduce en unas cantidades de contaminantes emitidas a la atmósfera de gran importancia.

Algunos estudios han revelado que en ciudades portuarias, similares a Cartagena, las emisiones de los barcos son en muchos casos la fuente dominante de contaminantes atmosféricos.

En el año 1997, para intentar controlar estas emisiones se desarrolló el Protocolo MARPOL, que incluía el Anexo sexto:..."Regulaciones para la prevención de emisiones desde buques". La importancia de este protocolo radica en que no sólo en los buques con banderas de países acogidos al mismo han de satisfacer las limitaciones por el impuestas, sino que los buques de la bandera que sea, hayan o no firmado el Protocolo, han de cumplir los límites establecidos al navegar por zonas de acogida al Protocolo.

Por su parte, la Unión Europea ha promulgado dos directivas respecto a esto. La 1999/32/ED y la 2005/33/EC, y son de aplicación para todos los barcos de 400 toneladas o más. Alternativamente, los barcos pueden emplear combustibles con mayores contenidos en azufre siempre que dispongan de un método de control adecuado para el SO₂ producido. En este caso deben estar en posesión de un certificado de prevención de la contaminación.

Ante todo lo expuesto, se observa que el problema es de gran complejidad, ya que resulta muy difícil establecer si un barco está satisfaciendo las regulaciones o no. Por otro lado, ningún país miembro puede impedir la navegación de un buque por motivos medioambientales. Así que, para asegurar que la Directiva 2005/33/EC se cumple, es necesario establecer unos controles mediante el muestreo de emisiones. Pero debido a la gran cantidad de buques que circulan por un puerto como el de Cartagena, un muestreo directo en los escapes de los mismos, resulta impensable. Sin embargo, la técnica **LIDAR (Light Detection And Ranging)**, podría permitir realizar un muestreo rápido a la entrada y/o salida de los buques del puerto y determinar así, el cumplimiento de la normativa, y en ese caso proceder a la inspección sólo de aquellos que resultaran señalados por el sistema de detección remota.

Esta tecnología, LIDAR, en uso de sus numerosos usos, permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie lanzando un haz láser pulsado, al igual que ocurre con la tecnología Radar, donde se utilizan ondas de radio en vez de luz. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. Dos longitudes de onda del pulso láser se seleccionan, una para el máximo de absorción del gas a cuantificar, y otra para un mínimo. Así, en física atmosférica, a través de instrumentos LIDAR, es posible medir densidades de ciertos constituyentes de la atmósfera, como el SO_2 , a través de un algoritmo concreto.

1.3.2. ¿Por qué el Dióxido de Azufre?

El **Dióxido de Azufre** (SO_2) es un importante contaminante primario de olor fuerte e irritante. Gran parte de él se convierte en iones sulfato (SO_4^{2-}) que pueden originar fenómenos como el *smog sulfuroso* (smog clásico) y la *lluvia ácida*. En la naturaleza es emitido en la actividad volcánica. Su emisión está disminuyendo en muchos lugares gracias a las medidas adoptadas, como la sustitución en las centrales térmicas de los carbones de baja calidad por combustibles más puros y limpios. Sin embargo, en el caso de los buques mercantes y de pasajeros, los combustibles utilizados son de muy baja calidad y con gran cantidad de impurezas, lo que lleva consigo una gran cantidad de emisión de gases contaminantes, entre ellos del Dióxido de Azufre. Además, hay que añadir la dificultad de controlar las emisiones de esos medios de transporte en continuo movimiento, salvo cuando se encuentran atracados en el puerto para la carga y descarga de mercancía en el caso de los buques mercantes, y para el embarque y desembarque de pasajeros en el caso de los buques y cruceros de pasajeros.

Este SO_2 produce lesiones en las hojas de las plantas, que pueden secarse o caerse antes de tiempo. Los efectos sobre las personas están relacionados principalmente con el sistema respiratorio y con la irritación de las mucosas, (especialmente los ojos), aunque requiere concentraciones mayores que las que afectan a las plantas. También provoca el deterioro de materiales, provocando por ejemplo, agrietamiento de pinturas e incrementando la corrosión de metales.

Concentración Dióxido de Azufre	Efecto
520 µg/m ³ (0,2 ppm)	Los individuos normales y asmáticos (leves, moderados, graves) y atópicos más sensibles mostraron un aumento significativo de la resistencia específica de la vía aérea (sRaw), pero no clínicamente significativos debido a que no había síntomas respiratorios.
1,7 µg/m ³ (0.00053 ppm)	Concentración en aire asociadas con un aumento del riesgo para toda la vida por leucemia de 1/100.000
655 µg/m ³ (0,25 ppm)	Voluntarios con asma leve sometidos a ejercicio moderado y expuestos durante 75 minutos no mostraron aumento considerable de la sRaw
3.200 µg/m ³ (1ppm)	Aparición de casos de leucemia en exposiciones de 40 años.
4.800-15.000 µg/m ³ (1,5-4,7 ppm)	Concentración en aire asociadas con un aumento del riesgo para toda la vida por leucemia de 1/10.000
1.050 µg/m ³ (0,4 ppm)	Individuos asmáticos de moderados a graves mostraron después de una exposición de 55 minutos aumentos significativos de la sRaw y de los síntomas respiratorios.
1.300 µg/m ³ (0,5 ppm)	Individuos asmáticos leves sometidos a ejercicio y expuestos durante 75 minutos mostraron aumento significativo de la sRaw.
1.300-5.240 µg/m ³ (0,5-2 ppm)	La función pulmonar cambia en sujetos asmáticos durante el ejercicio
1.570 µg/m ³ (0,6 ppm)	Individuos asmáticos atópicos mostraron después de una exposición de 15 a 55 minutos aumentos significativos de la sRaw y de los síntomas respiratorios.
2.620 µg/m ³ (1 ppm)	Individuos asmáticos leves sometidos a ejercicio y expuestos durante 75 minutos mostraron aumento significativo de la sRaw.
5.240 µg/m ³ (2 ppm)	Individuos sanos sometidos durante 30 minutos y realizando ejercicio continuo no mostraron cambios en pruebas de función pulmonar.
7.900-13.000 µg/m ³ (3-5 ppm)	Detección del olor
16.000-31.000 µg/m ³ (6-12 ppm)	Puede causar irritación nasal y de la garganta.
21.000-31.000 µg/m ³ (8-12 ppm)	Puede producir irritación conjuntival y lagrimeo
26.000 µg/m ³ (10 ppm)	Se puede observar irritación en las vías respiratorias

	superiores y posibles hemorragias nasales.
52.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (20 ppm)	Puede causar irritación en los ojos
131.000-262.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (50-100 ppm)	Se puede observar irritación grave de los ojos, garganta, tracto respiratorio inferior y lagrimeo, que pueden ser tolerados durante 30 - 60 minutos.
262.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (100 ppm)	IDLH (Inmediatamente peligroso para la vida y la salud; 30 minutos)
1.049.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (400 ppm)	Concentración mínima letal en aire durante una exposición de 1 minuto.

Tabla 3: Efectos dióxido de azufre en la salud humana. Fuente: Consejería de Sanidad y Política Social de la Región de Murcia.

1.3.3. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son varios, y serán tanto teóricos como prácticos.

Por un lado, como objetivos primarios, referentes a aspectos teóricos, tenemos:

- El estudio y descripción de la técnica de medición remota LIDAR (Light Detection And Ranging).
- Descripción del equipo LIDAR DIAL (Differential Absorption Lidar) Elight UV11, y su funcionamiento para la medición de contaminantes atmosféricos.
- Adecuación del equipo LIDAR DIAL Elight UV11 para la medida de Dióxido de Azufre.

Y por otro lado, y como objetivo práctico, se pretende:

- La cuantificación de las emisiones de Dióxido de Azufre desde los buques mercantes, de pasajeros y de maniobras militares que utilizan las dársenas del Puerto de Cartagena mediante el equipo LIDAR DIAL Elight UV11.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. INTRODUCCIÓN

La óptica atmosférica involucra la transmisión, absorción, emisión, refracción y reflexión de la luz por parte de la atmósfera y es probablemente uno de los fenómenos ópticos del que se hacen más observaciones. La atmósfera es un fluido que interactúa con la luz debido a su composición, que bajo condiciones normales, está constituida por una gran variedad de especies moleculares y pequeñas partículas o aerosoles. Estas propiedades físicas y químicas cambian en función del tiempo, la altitud y la ubicación geográfica (son altamente dependientes de las condiciones locales y regionales). La mayoría de estas propiedades pueden describirse en un nivel adecuado observando la composición de lo que generalmente se denomina atmósfera estándar. De esta manera, se obtiene una base para la determinación cuantitativa de la interacción a nivel molecular de gases, aerosoles y partículas en la atmósfera con un frente de onda óptica que se propaga a través de ésta.

2.2. LIDAR

2.2.1. Antecedentes

Las técnicas **LIDAR** (acrónimo de **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) permiten el sondeo de la atmósfera (aunque no necesariamente limitado a éste) mediante haces láser.

El sondeo remoto de la atmósfera mediante haces de luz (grandes reflectores) antecede la propia invención del láser. Fue sin embargo, el nacimiento de este último en los años 60's, el que, ofreciendo anchos espectrales muy reducidos ($<0.01\text{nm}$) y una directividad sin precedentes, supuso un gran avance para estas técnicas de teledetección activa. Así, en 1962, Fiocco y Smullin rebotaron por primera vez un haz láser en la Luna: había nacido el LIDAR. Ese mismo año, McClung y Hellwarth inventaban el Q-switch, tecnología que permitía generar pulsos de luz muy cortos (10ns) y con elevadas energías de pico (1J), lo cuál se traduce en potencias pulsadas del orden de 100 MW. Posteriormente, en 1973, ya se tiene constancia de un primer LIDAR utilizando un láser semiconductor de AsGa.

En la actualidad, los sistemas LIDAR representan la contrapartida más cercana a los radares de microondas, con la salvedad que la radiación de RF se ha sustituido por otra en las bandas ópticas y que las resoluciones espaciales resultan muy superiores, del orden de unos pocos metros. El espectro de longitudes de onda de trabajo puede comprender desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR).

Como una realidad imparable, los sistemas LIDAR están empezando a reemplazar los sensores *in situ* (p. ej., sondas locales tales como anemómetros, higrómetros y termómetros) y radiosondas (instrumentos embarcados en globos sondas controlados por radio).

Las aplicaciones de los sistemas LIDAR son enormes y comprenden desde ambiciosos proyectos espaciales como LAWS (Lidar Atmospheric Wind Sounder, NASA) y ALADIN (Atmospheric LAsEr Doppler INstrument, ESA), orientados a realizar mapas de viento a escala mundial, hasta sistemas terrestres y embarcados (diversos proyectos en el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y en la UE fruto de diversos Programas Marco de I+D e iniciativas privadas) que abarcan tanto aplicaciones meteorológicas como medioambientales: las primeras utilizan los lidares para derivar la densidad de aerosoles, velocidad y dirección del viento (el estado del arte actual permite alcances en torno a 20 km de altura con resoluciones mejores de 3 m/s), concentración de especies químicas (con lo que ello supone desde el punto de vista regulador), variables físicas (en particular, perfiles de temperatura hasta unos 100km de altura con precisiones de 1km) y estudios ceilométricos (altura y espesor de nubes, por la importancia de éstas en el balance radiativo tierra-atmósfera).

En el campo medioambiental, los sistemas LIDAR permiten detectar y monitorizar la dispersión de aerosoles y efluentes contaminantes como O₃, SO₂, NO_x (óxidos de nitrógeno), CO, CO₂, H₂ S, CH₄ y C₆ H₆, entre otros, emitidos desde plantas industriales y químicas hasta el receptor crítico, a distancias típicas de 5km, con sensibilidades de unas pocas ppb (partes por billón) y resoluciones de 10m. Los lídares embarcados en barcos y helicópteros también ofrecen interesantes aplicaciones de batimetría láser (estudio de fondo marino) en regiones costeras.

Las ondas de radio y las microondas se han usado para detectar objetos lejanos a través del uso de **RADAR** (**RA**diowave **D**etection **A**nd **R**anging). Este es un sistema que se usa para detectar, determinar la distancia y mapear objetos. Las ondas de radio son transmitidas y un receptor escucha el eco. Analizando la señal recibida (reflejada), el objeto se puede localizar e identificar.

Esta misma tecnología se puede usar con longitudes de onda visibles o cerca del visible.

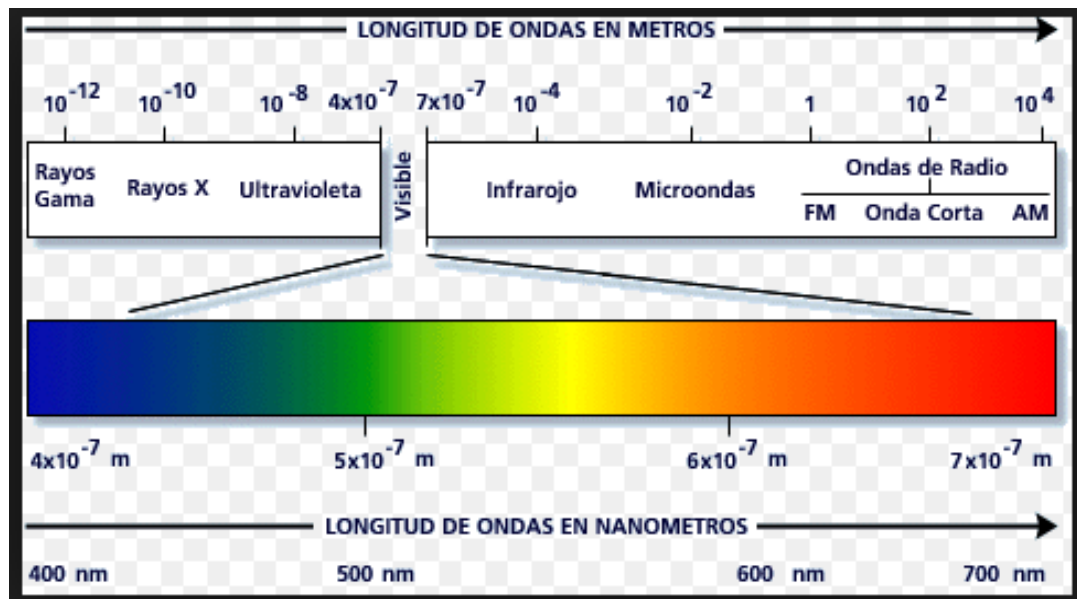


Figura 1: Espectro electromagnético.

2.2.2. Características LIDAR

LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). También se conoce como, **LADAR** (**L**aser **D**etection **A**nd **R**anging), pero este término es usado principalmente en el contexto militar. De igual forma, el término **radar láser**, también es usado.

Un objeto necesita producir una discontinuidad dieléctrica para poder reflejar la onda transmitida. Con las frecuencias del RADAR un objeto metálico produce una gran reflexión, pero los objetos no metálicos, como la lluvia, rocas, entre otros; producen reflexiones débiles y algunos otros materiales no producen una reflexión detectable; esto quiere decir que, para las frecuencias del RADAR algunos objetos son prácticamente invisibles.

Otra ventaja del LIDAR es que muchas sustancias químicas interactúan más fuertemente con longitudes de onda visibles que con microondas.

Este sistema permite hacer mediciones mejores que las obtenidas con el RADAR. Esto es debido a que:

- 1) Las longitudes de onda cortas permiten mejor resolución angular.
- 2) Los pulsos cortos que se pueden generar con luz permiten mejor resolución de distancias.
- 3) Las longitudes de onda usadas permiten dispersión significativa de aerosoles.

- 4) La energía de los fotones involucrada permite detectar átomos o moléculas específicas.

Es un sistema que usa un haz de luz en lugar de microondas para monitoreo. Transmite pulsos láseres y detecta la dispersión de la señal retrodispersada. El rango de la dispersión del objeto es determinado con el tiempo de demora entre la transmisión y la detección.

El Sistema LIDAR, consta principalmente de tres componentes:

- Transmisor.
- Receptor.
- Sistema de detección.

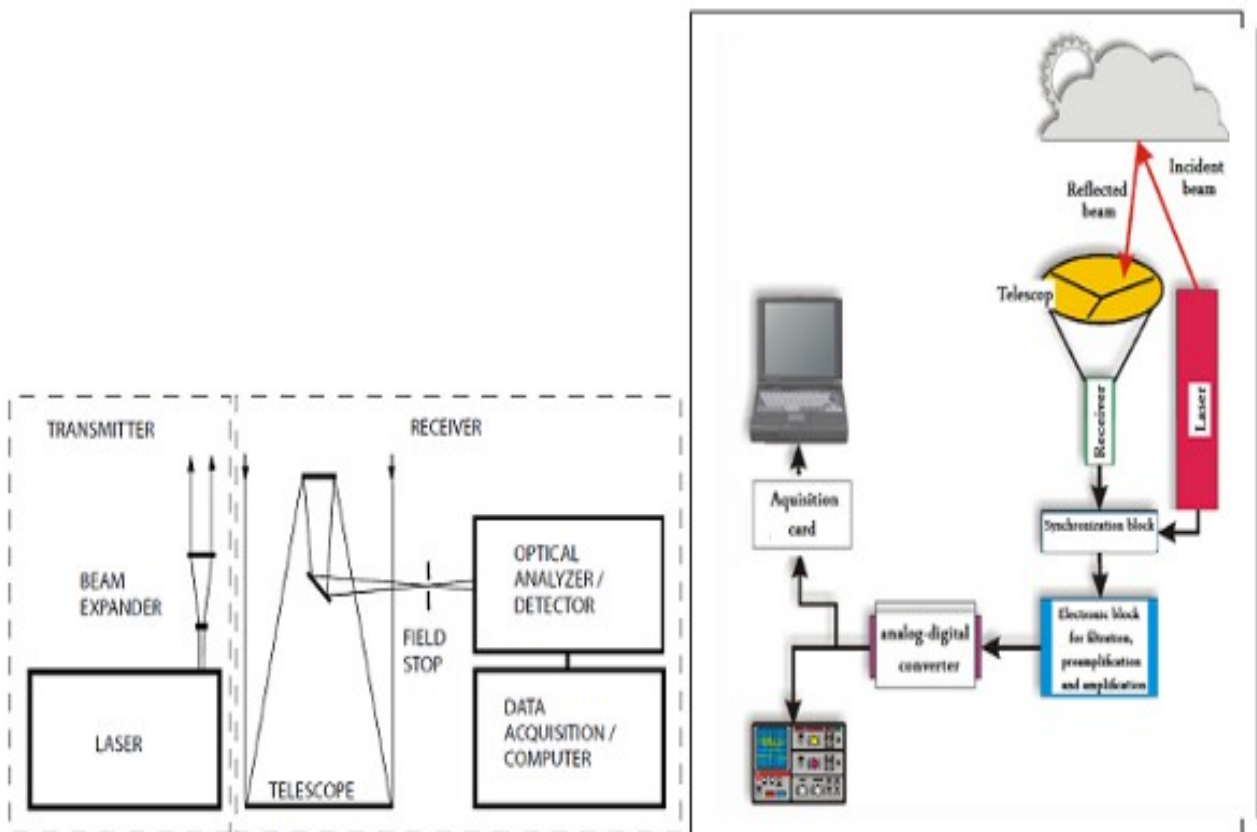


Figura 2: Esquema componentes Lidar

En resumen, el Sistema LIDAR consiste en dirigir un haz de luz láser con una o dos longitudes de onda correspondientes (por lo general, a la franja visible o ultravioleta) al aire que contiene las moléculas cuya presencia y cantidades se desea determinar. Se mide la radiación que disperse la sustancia buscada, la cual está relacionada con su concentración en el aire.

Es necesario tener en cuenta la capacidad de dispersar la luz que tienen distintas zonas de la atmósfera, variable de acuerdo con las propiedades físicas locales de esta (así, la dispersión que produce una nube es diferente de la producida por el aire sin nubes). La atmósfera origina un fondo de dispersión que nada tiene que ver con la señal de la especie química que se desea analizar. Para substraer el efecto del fondo de dispersión de la señal del contaminante buscado se usa un segundo láser, que opera fuera de la zona de resonancia.

Para diseñar un sistema LIDAR y su láser asociado se debe saber qué tipo de señal se espera. El receptor de la mayoría de los sistemas LIDAR es un tubo fotomultiplicador o un fotodiodo.

Además, cualquier sistema LIDAR atmosférico debe trabajar en una región de alta transmisión atmosférica.

La longitud de onda, la energía y duración del pulso láser son muy importantes.

También se debe tener en cuenta el tamaño, fiabilidad, comodidad de uso, eficiencia y costo del láser. Deben ser robustos y no necesitar demasiadas tareas de mantenimiento continuo.

Algunos **tipos de láseres**, son los siguientes:

- **Láseres de Neodimio:** pulsos de energía y duración apropiada, no muy sintonizables (para utilizarlos como DIAL o fluorescente es necesario combinarlos con un sistema de sintonización, por ejemplo el OPO), longitud de onda de nm (dispersión de aerosoles, no seguro para la vista). El equipo de la UPCT, dispone de este tipo de Láser.
- **Láseres sintonizables cerca del Infrarrojo:** usados para DIAL, ya que requiere pulsos cortos y de alta energía, pero además debe poder ser sintonizable en dos longitudes de onda dependiendo de la característica de absorción de la molécula.
- **Láseres en medio del Infrarrojo:** más seguros para la vista.
- **Láseres de UV:** la detección de ozono, SO₂ y otros agentes biológicos, requieren de láseres que operen en la región de 300nm.

2.2.3. Tipos de LIDAR

En general, los sistemas LIDAR se puede clasificar en dos tipos: Sistema de alta energía y sistemas de micropulsos LIDAR.

Podemos identificar los siguientes tipos:

- **Distancia de objetos sólidos (Hard Target Ranging)**
 - Es el más simple. Muy parecido al RADAR.
 - Un láser pulsado es usado para enviar un pulso corto de luz a un objeto sólido.
 - Midiendo el tiempo que toma hasta que la señal regresa nos permite determinar la distancia del objeto.
 - Si estas señales son registradas se puede obtener una imagen tridimensional.
 - Usos: reconocimiento de autos, cálculo de velocidades, monitorear vibraciones.
- **Mapeo de aerosol (Aerosol Mapping)**
 - Aplicación más común.
 - El sistema LIDAR es escaneado en dirección angular y la señal de dispersión de regreso de cada pulso es registrado como función del tiempo.
 - Usos: determinar la distribución de gotas de agua en una nube, el humo, medir la velocidad del viento (aeropuertos).
- **DIAL (Differential Absorption Lidar)**
 - Una variante importante del LIDAR
 - Usa láseres de dos longitudes de onda distintas, seleccionadas para que una de estas longitudes de onda sea absorbida por la molécula que nos interesa y la otra longitud de onda no. La diferencia entre la intensidad de las dos señales de regreso indica la energía absorbida por la especie, y de esta forma podemos deducir la concentración de la molécula investigada.
 - Usos: las moléculas de SO_2 absorben a una longitud de onda de 286nm, el ozono a 290-300nm, el agua a 820nm, el NO_2 a 450nm. Por tanto, se usa para medir concentraciones químicas. En la figura 3,

podemos observar el espectro de absorción para el SO₂ y el ozono.

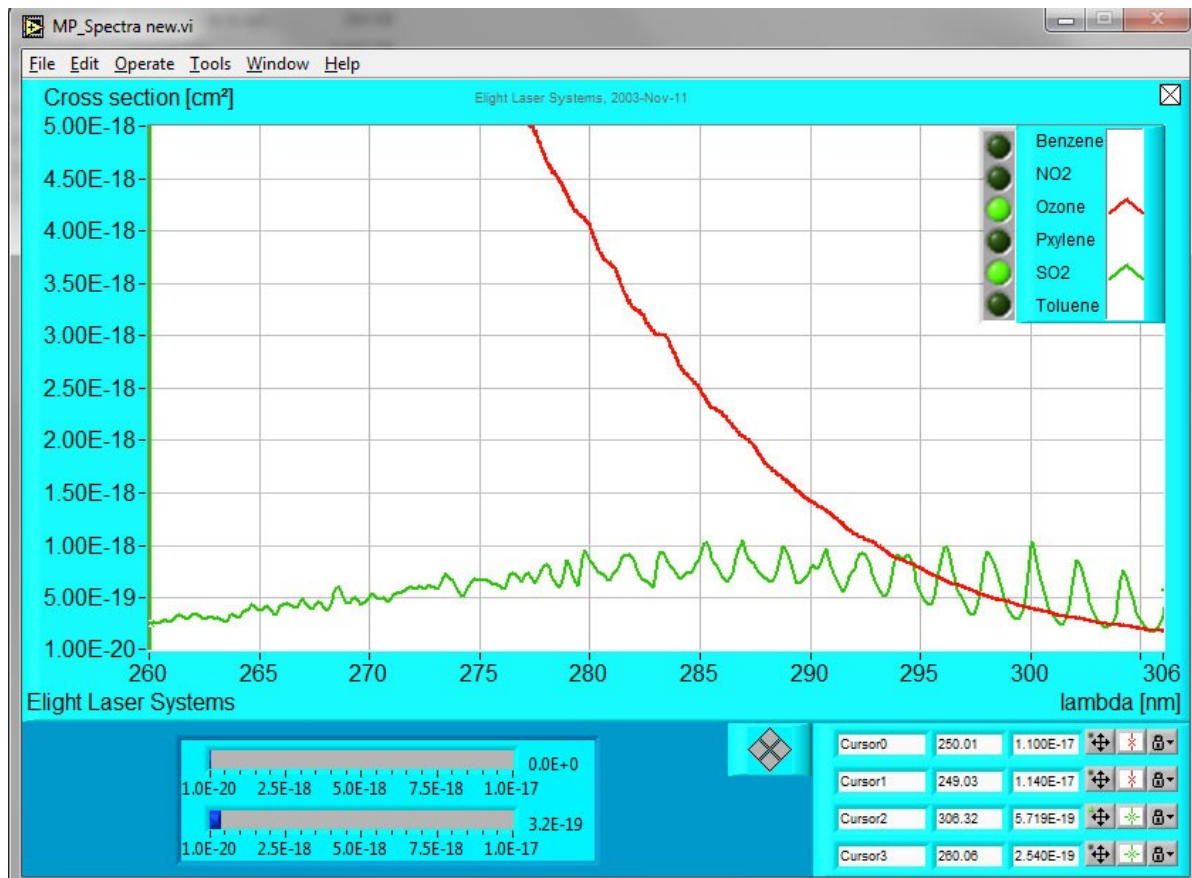


Figura 3: Espectro de absorción para dióxido de azufre y ozono.

- **Lidar Raman y de Fluorescencia**

- El efecto Raman se usa mandando un pulso de una longitud de onda y observando el cambio Raman de la señal de regreso de las diferentes especies atómicas y moleculares.
- Una técnica alternativa es usar un láser sintonizado en la línea de absorción de la especie estudiada y observar la fluorescencia radiada por el átomo o la molécula mientras decae al estado base.
- Usos: herramienta robusta para medir un amplio rango de propiedades meteorológicas y ambientales.

2.3. EL MÉTODO LIDAR

2.3.1. Principio LIDAR

El método LIDAR, es un método de detección activo, el cual usa la velocidad de la luz. La señal de luz va desde la fuente hasta un objeto y vuelve de nuevo, para definir la distancia entre ambos.

Se requiere una fuente de luz (láser) y un detector con una buena resolución temporal. De acuerdo con las leyes que describen la interacción con los átomos, moléculas o partículas de aerosol hay varias alternativas del *Principio del LIDAR*. Todas ellas tienen en común la emisión de pequeños pulsos de luz a la atmósfera y la detección y el análisis de la luz retrodispersada. La longitud de onda es seleccionada de esta forma, en función del elemento que se quiera medir. La intensidad de la luz retrodispersada hace posible indicar la magnitud de la variable que va a ser medida. A partir del tiempo t después de la emisión del pulso de luz, se puede definir la distancia x tomando la velocidad de la luz c :

$$x = \frac{ct}{2}$$

El factor $\frac{1}{2}$ es debido al doble camino de las señales de luz, las cuales son recogidas de nuevo por el Sistema Lidar. La representación de este método descrito puede verse esquematizada en la figura 4.

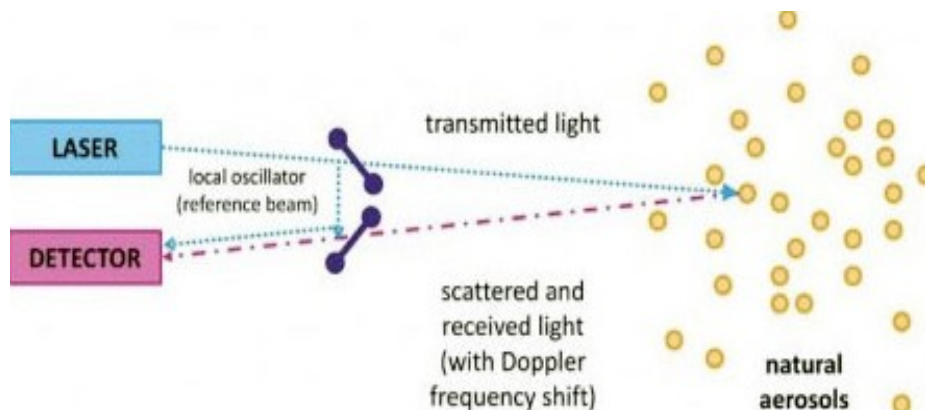


Figura 4: Esquema del Principio Lidar.

Después de la emisión del pulso láser con la longitud de onda λ , una señal $P(x, \lambda)$ es recogida por el detector, cuya progresión temporal es dada por la Ecuación:

$$P(x, \lambda) = \frac{c \Delta t}{2} P_0 \frac{A \eta O(x)}{x^2} \beta(\theta = \pi, x, \lambda) \tau^2(x, \lambda)$$

c	<i>speed of the light</i>
Δt	<i>duration of the laser pulse</i>
P_0	<i>average transmission power of the emitted laser pulse</i>
A	<i>area of the receiver optics</i>
η	<i>efficiency of the receiver optics</i>
$O(x)$	<i>range dependent overlap between the transmitted beam and the field of view of the receiver</i>
$\beta(\theta = \pi, x, \lambda)$	<i>backscattering coefficient</i>
θ	<i>scattering angle</i>
$\tau(x, \lambda)$	<i>transmittance of the atmosphere, from the measuring system to the place of scatter at distance x</i>

Ecuación 1: Progresión temporal pulso láser.

La señal $P(x, \lambda)$ depende de dos tipos de parámetros:

- Parámetros relacionados al propio Sistema Lidar, dependiendo de los elementos usados para la emisión y detección.
- Relacionados con la atmósfera, describiendo la extinción de la luz emitida.

Empezando por este principio, en el que la duración del pulso láser $\Delta t/2$ es más corto que el tiempo de resolución definido por el aparato, es posible recoger la señal $P(x, \lambda)$.

Además, se asume que el fotón registrado por el Sistema de recepción Lidar ha sufrido un proceso de dispersión.

La superposición integral $O(x)$ según la distancia es aproximadamente cero para distancias cortas, pero se incrementa en las zonas de transición y toma el valor de 1 para largas distancias en las cuales el rayo de emisión es propagado completamente dentro del campo óptico del receptor. La transmitancia de la atmósfera $\tau(x, \lambda)$ es obtenida a partir del coeficiente de extinción de la atmósfera $\alpha(x)$ y el producto de la densidad de partícula $N(x)$ y la sección de absorción $\sigma(\lambda)$ del gas objetivo para integración, con respecto a la distancia variable ξ :

$$\tau(x, \lambda) = \exp \left\{ - \int_0^x \left[\alpha(\xi) + N(\xi) \sigma(\lambda) \right] d\xi \right\}$$

$N(x)$: *particle density of the gas*

σ : *absorption cross section*

Ecuación 2: Transmitancia de la atmósfera.

2.3.2. La ecuación LIDAR

La forma de la expresión matemática que se debe usar para obtener información de parámetros atmosféricos mediante láser, depende del tipo de interacción que tenga lugar entre los constituyentes atmosféricos que se pretenden estudiar y la radiación láser empleada. Para poder obtener información de la atmósfera a partir de la radiación retrodispersada es necesario determinar una relación entre la energía recibida en el sistema receptor en términos de parámetros atmosféricos que modifican el perfil láser y de parámetros propios del instrumento que lleva a cabo la medida.

Cuando el Sistema Lidar detecta radiación retrodispersada por la atmósfera en la misma longitud de onda que la emitida por el láser, se dice que el sistema presenta configuración elástica y permite obtener la distribución vertical del aerosol atmosférico a partir de la dispersión elástica. Por el contrario, cuando el Sistema Lidar detecta radiación retrodispersada inelásticamente por efecto Raman, se dice que el sistema presenta configuración Raman o inelástica.

Configuración	$\lambda_{recibida}$	Ecuación
Elástica	$\lambda = \lambda_L$	$P(\lambda_L, R) = P_0(\lambda_L) C \frac{O(R)}{R^2} \beta(\lambda_L, R) \exp \left(- 2 \int_0^R \alpha(\lambda_L, \zeta) d\zeta \right)$
Raman	$\lambda \neq \lambda_L$	$P(\lambda, \lambda_L, R) = P_0(\lambda_L) C \frac{O(R)}{R^2} \beta(\lambda, \lambda_L, R) \exp \left(- \int_0^R [\alpha(\lambda, \zeta) + \alpha(\lambda_L, \zeta)] d\zeta \right)$

Ecuación 3: Ecuación Lidar Elástica y Raman.

2.4. DIFFERENTIAL ABSORPTION LIDAR (DIAL)

Los sistemas **DIAL** (**D**ifferential **A**bsorption **L**idar). Como su nombre sugiere, el principio de medida es de naturaleza diferencial, de forma que utilizan dos (o más) longitudes de onda sintonizables, una absorbida, en gran proporción, por el gas o especie química a detectar y otra (habitualmente próxima en longitud de onda) absorbida en cantidades muy bajas.

El principal atractivo de estos sistemas es que no solo son capaces de detectar la distancia de la que proviene la luz dispersa y la cantidad de sustancia que provoca la retrodispersión, sino que además permiten conocer qué molécula ha provocado esta dispersión, es decir, el contaminante que hay en la atmósfera. Para ser más precisos, la longitud de onda de los rayos se elige de manera que sean tan solo sensibles a una especie química, siendo relativamente transparentes a las demás. Esta es la principal ventaja de estos lídares frente a los Raman, junto a su gran sensibilidad, y el hecho de que el procedimiento de medida diferencial tiende a cancelar errores instrumentales. Los alcances típicos con aparatos que utilizan esta técnica, son de algunos kilómetros y, desde 1990 existen equipos comerciales a bordo de furgonetas y camionetas, que realizan medidas en terminales de gas y petrolíferos por diversos puntos de Europa.

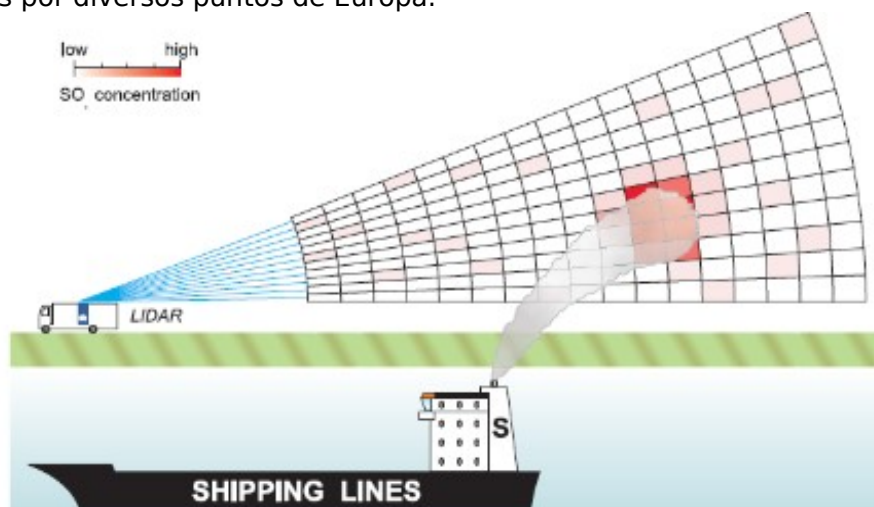


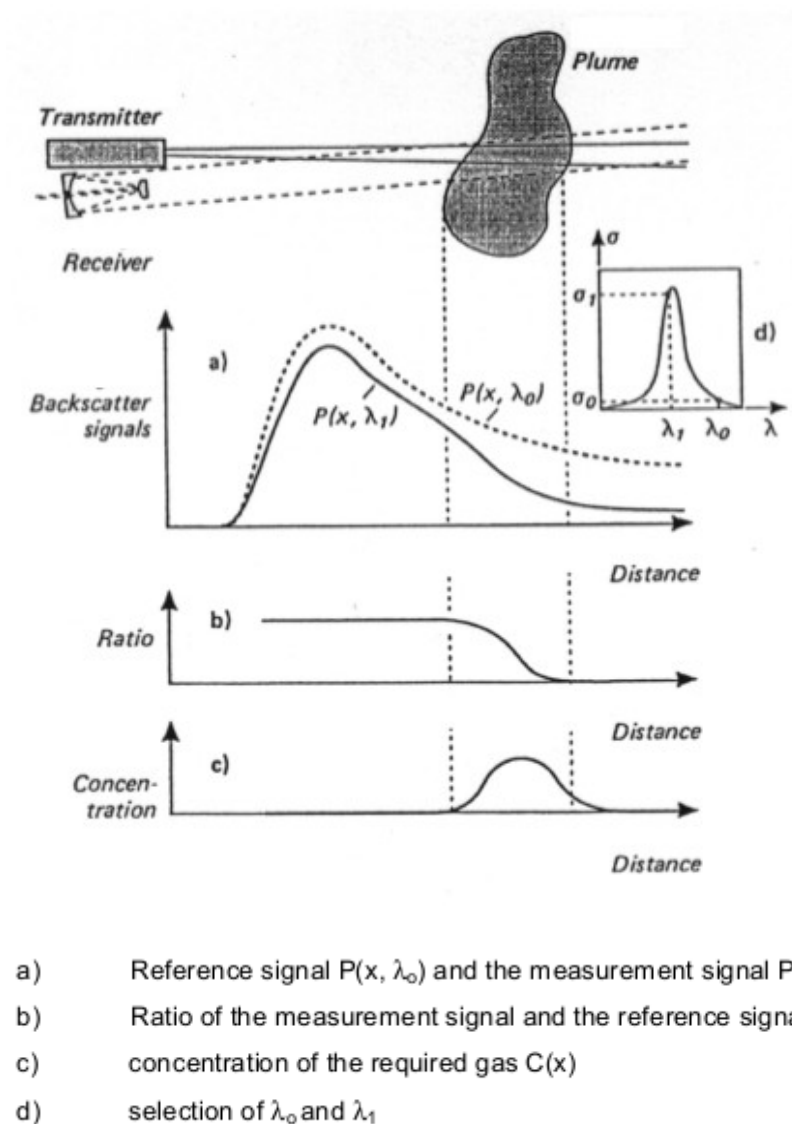
Figura 5: Ejemplo medida remota DIAL

Una de las dos longitudes de onda que se envían, denominada λ_{on} , se elige de manera que sea absorbida intensamente por la especie de interés. La otra, denominada λ_{off} , es muy cercana a la frecuencia on , pero se elige de manera que sea muy poco absorbida por la sustancia. La cercanía entre las frecuencias on y off , hace que ambas se dispersen de manera casi idéntica, por lo que el efecto del factor $\beta(R)$ queda eliminado de la ecuación lidar. Este factor tiene que ver con el coeficiente de dispersión angular.

La ecuación que debe usarse para conseguir los valores de concentración de la sustancia buscada, es la siguiente, donde M es la masa molecular de la misma, λ_1 y λ_0 son equivalentes a λ_{on} , y λ_{off} :

$$C(x) = \frac{M}{2[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_0)]} \cdot \frac{d}{dx} [\ln P(x, \lambda_0) - \ln P(x, \lambda_1)]$$

Ecuación 4: Concentración de sustancia objeto mediante DIAL.



- a) Reference signal $P(x, \lambda_0)$ and the measurement signal $P(x, \lambda_1)$
- b) Ratio of the measurement signal and the reference signal
- c) concentration of the required gas $C(x)$
- d) selection of λ_0 and λ_1

Figura 6: Principio de medida de Absorción Diferencial Lidar.

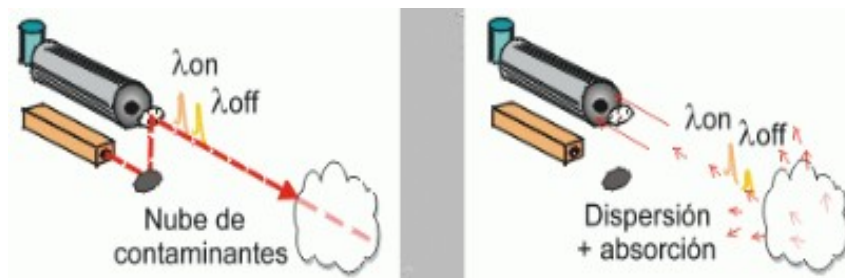


Figura 7: Detalle medida DIAL

Uno de los contaminantes considerados como principales por las cantidades que se generan y el daño que causan es el **Dióxido de Azufre (SO₂)**. Es el causante de las lluvias ácidas y de la acidificación y esterilización de suelos y aguas, como se comentó anteriormente. Esta sustancia puede monitorizarse mediante DIAL. En el equipo Elight UV11 **Su frecuencia on se encuentra alrededor de 286,9nm, mientras que su frecuencia off está alrededor de 286,3nm**. Todo el sistema que compone el dispositivo DIAL puede montarse en un camión, logrando así la movilidad del Sistema, que puede colocarse allí donde se desea medir.

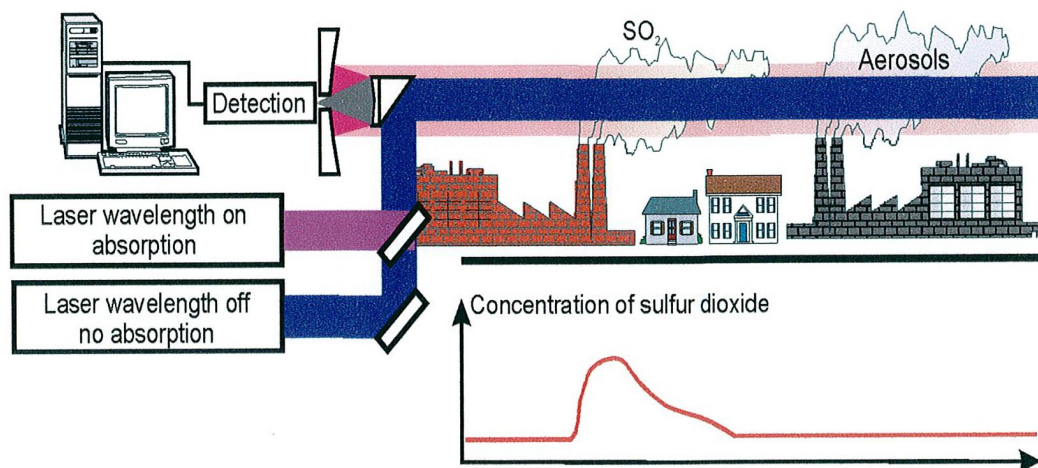


Figura 8 : Ejemplo de medida de Absorción Diferencial Lidar para dióxido de azufre.

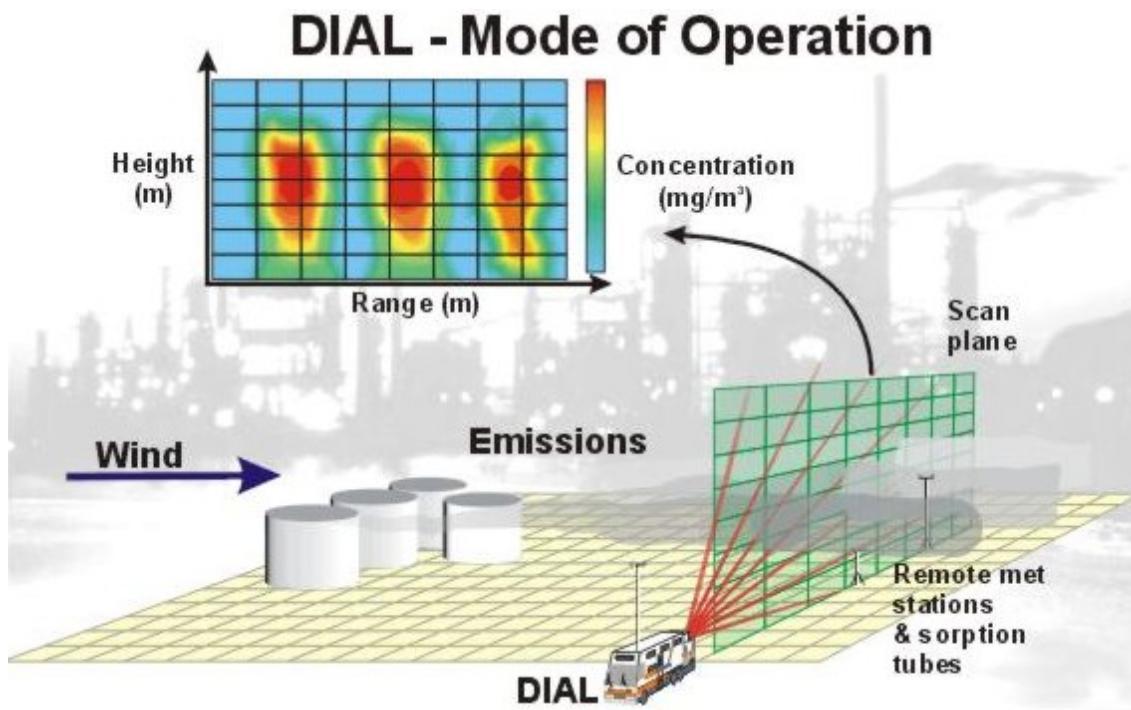


Figura 9: Visión general del modo de funcionamiento – DIAL.

2.5. OTRAS TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN

A parte de la Técnica DIAL, en la que nos centraremos, existen numerosas técnicas ópticas para la monitorización del flujo de gas de dióxido de azufre, tanto en estudios atmosféricos como vulcanológicos. En la actualidad, se están utilizando con mucho éxito: la **espectroscopía de correlación (COSPEC)**, la **espectroscopía de la Transformada de Fourier en el Infrarrojo (FTIR)**, la **espectroscopía diodo láser**, la **espectroscopía de correlación de gas (GASPEC)** y la **espectroscopía de absorción óptica diferencial (DOAS)**.

Entre estas técnicas de monitoreo desde el suelo, la más común es el **Espectrómetro de Correlación COSPEC**, que ha sido usado en vulcanología desde hace treinta años. Basados en ese instrumento han aparecido las otras técnicas, incluida la técnica Lidar.

Este COSPEC, es un instrumento opto-mecánico que tiene cuatro máscaras o discos de correlación con pequeñas rendijas que corresponden a los picos y valles de absorción de dióxido de azufre en el rango de 300-315nm. Utiliza celdas de calibración para inferir las densidades de columna en ppm.m y tiene un sistema de ganancia cuando la radiación que ingresa en el sistema es muy débil. El sensor es un tubo fotomultiplicador y tiene un sistema óptico externo, compuesto de un telescopio Cassegrain y uno interno, integrado por espejos, rejilla de difracción,

discos de correlación y tubo fotomultiplicador. El COSPEC es usado en medidas pasivas desde el suelo, montado en un trípode para hacer barridos de la pluma, desde vehículos terrestres y aéreos. Para inferir los caudales de gas, se requiere medir el ancho de la pluma, la velocidad del viento a la altura de la pluma y tomar correcciones sobre temperatura, presión y oblicuidad de la medida respecto a la pluma.

En cuanto al **Sistema DOAS**, está basado en la transferencia de un haz de luz desde una fuente especial (una lámpara de xenón de alta presión), a través de un camino determinado y usando avanzados cálculos para evaluar y analizar las pérdidas de luz debidas a la absorción molecular a lo largo del camino óptico. La luz emitida por la lámpara de xenón es muy intensa, e incluye tanto el espectro visible como las longitudes de onda ultravioletas e infrarrojas.

La luz es capturada por un receptor y conducida a través de una fibra óptica al analizador. La fibra permite instalar el analizador fuera de los entornos agresivos donde se suele realizar la medición.

El analizar incluye un espectrómetro de alta calidad, un ordenador y los circuitos de control asociados. El espectrómetro divide la luz en bandas estrechas de longitud de onda usando una rejilla óptica. Esta rejilla puede ser ajustada hasta que el rango óptimo de longitudes de onda es detectado.

La luz es transformada en señales eléctricas. El detector realiza barridos a gran velocidad., determinando un gran número de valores instantáneos, para dar forma a un gráfico del espectro en el rango de longitud de onda pertinente. Este barrido es repetido cien veces por segundo, y los espectros registrados son almacenados en la memoria del ordenador esperando su evaluación.

El espectro absorbido en el camino óptico es comparado con uno calculado por el ordenador. El espectro calculado consiste en una adición bien equilibrada de los espectros de referencia para el análisis en cuestión.

El ordenador procede variando los factores de tamaño para cada espectro de referencia, hasta que alcanza el mejor posible. De esta manera, las diferentes concentraciones de gasees pueden ser calculadas con gran precisión.

3. EQUIPO LIDAR DIAL UPCT

3.1. INTRODUCCIÓN

El equipo DIAL de la Universidad Politécnica de Cartagena se encuentra montado en un vehículo (camión), **LIDAR UV11** para monitoreo de contaminación de aire en 3D, desarrollado y construido por Elight Laser Systems GmbH. El sistema que utiliza está basado un principio similar al del Radar, como se comentó anteriormente. En lugar de usar ondas de radio, son pulsos de luz los emitidos a la atmósfera, dónde son dispersados y absorbidos por los contaminantes (moléculas y partículas). La retrodispersión de la luz es registrada por un detector y analizada por el software integrado en el aparato, dando valores de la concentración de contaminantes de modo espacial y temporal. De esta forma, el LIDAR UV11 permite la determinación de contaminantes en concentraciones muy bajas. Con solamente un sistema es posible obtener información en tres campos: emisión, transmisión e inmisión.

3.2. CAMPOS DE APLICACIÓN DEL LIDAR UV11

- **Emisión:**
 - Sensores remotos para emisiones desde plantas estacionarias (plantas de energía, plantas industriales, etc.).
 - Detección de las emisiones totales de un área (polígonos industriales, aeropuertos).
 - Detección de emisiones desde fuentes lineales (carreteras).
 - Observación del comportamiento temporal y espacial de columnas.
 - Detección de emisiones difusas (ejemplo desde un tanque de almacenamiento).
 - Obtención de valores para realizar modelos de dispersión.
- **Transmisión e inmisión:**
 - Observación del transporte y los procesos de reacción en los niveles bajos de la troposfera.
 - Detección de capas de inversión y almacenamiento.
 - Obtención de datos para la evaluación y desarrollo de modelos atmosféricos (modelos de transporte, modelos meteorológicos).

- Soporte para el planeamiento de redes de medida de aire.
- Efectos determinados para prevenir contaminación (rutas alternativas de tráfico).
- Obtención de datos para entender los fenómenos de smog en invierno y verano.
- Obtención de información sobre las causas de los altos niveles de contaminación local.

3.3. SELECCIÓN DE LONGITUDES DE ONDA

La base de la cuantificación de contaminantes usando absorción diferencial, es el conocimiento preciso de las partes de las mezclas de las moléculas en cuestión. Mientras los átomos pueden presentar excepcionalmente líneas de absorción claras, definidas por los niveles de energía de los electrones causados por las transiciones electrónicas, los espectros de absorción de moléculas están relacionados a los niveles de energía oscilatorios y rotatorios. Esto es porque las moléculas revelan anchos de banda de absorción largas. Ellas tienen estructuras muy finas que pueden ser medidas con métodos de alta resolución mediante espectroscopía láser.

A continuación, podemos observar en la tabla, los pares de longitudes de onda usados con el LIDAR de la UPCT, Elight LIDAR UV11. Este aparato ofrece la posibilidad de usar un número máximo de 16 longitudes de onda. Por razones mecánicas, la diferencia entre longitudes de onda consecutivas no debe exceder de 2nm.

Pollutant	λ_1 [nm]	λ_0 [nm]	$\sigma(\lambda_1)$ [10^{-19} cm^2]	$\sigma(\lambda_0)$ [10^{-19} cm^2]
NO ₂	398.3	397.0	6.84	5.69
SO ₂	286.9	286.3	10.41	6.58
Ozone	286.3	282.4	21.49	31.41
Toluene	266.9	266.1	11.86	1.90
Benzene	259.1	257.9	13.72	0.37

Tabla 2: Longitudes de onda y la correspondiente absorción para medida de contaminantes con LIDAR UV11.

3.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

3.4.1. El concepto

El **UV11** Lidar de absorción diferencial de varias longitudes de onda, está instalado en un vehículo tipo camioneta como se muestra en la figura 10.

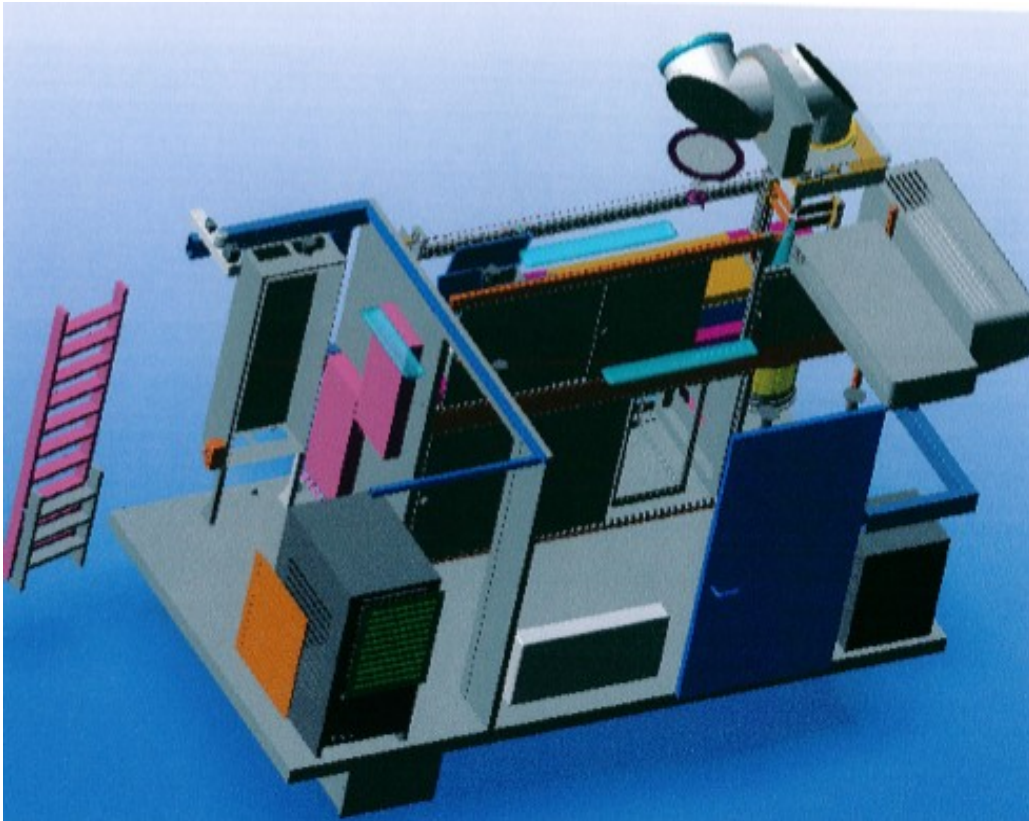


Figura 10: Vista 3D del Sistema Lidar (no se muestran todas las partes).

El sistema se compone de una **Fuente Láser Nd-YAG**, (acrónimo del inglés neodymium - doped yttrium aluminium garnet), a partir de la cual se emite un láser en medio sólido que utiliza el dopaje con neodimio de cristales de óxido de itrio y aluminio, una variedad de granate, para la amplificación de su radiación de longitud de onda características de 1064 nanómetros, en el infrarrojo.

Este tipo de láser funciona en el modo llamado **Q-switching**, en el que un interruptor óptico insertado en el compartimento del láser (Ver Fig.11), impide que el láser sea disparado hasta que la cantidad de iones de neodimio sea máxima. Abre y cierra 20 veces por segundo cuando la intensidad del haz es máxima entre el oscilador y el amplificador del láser.

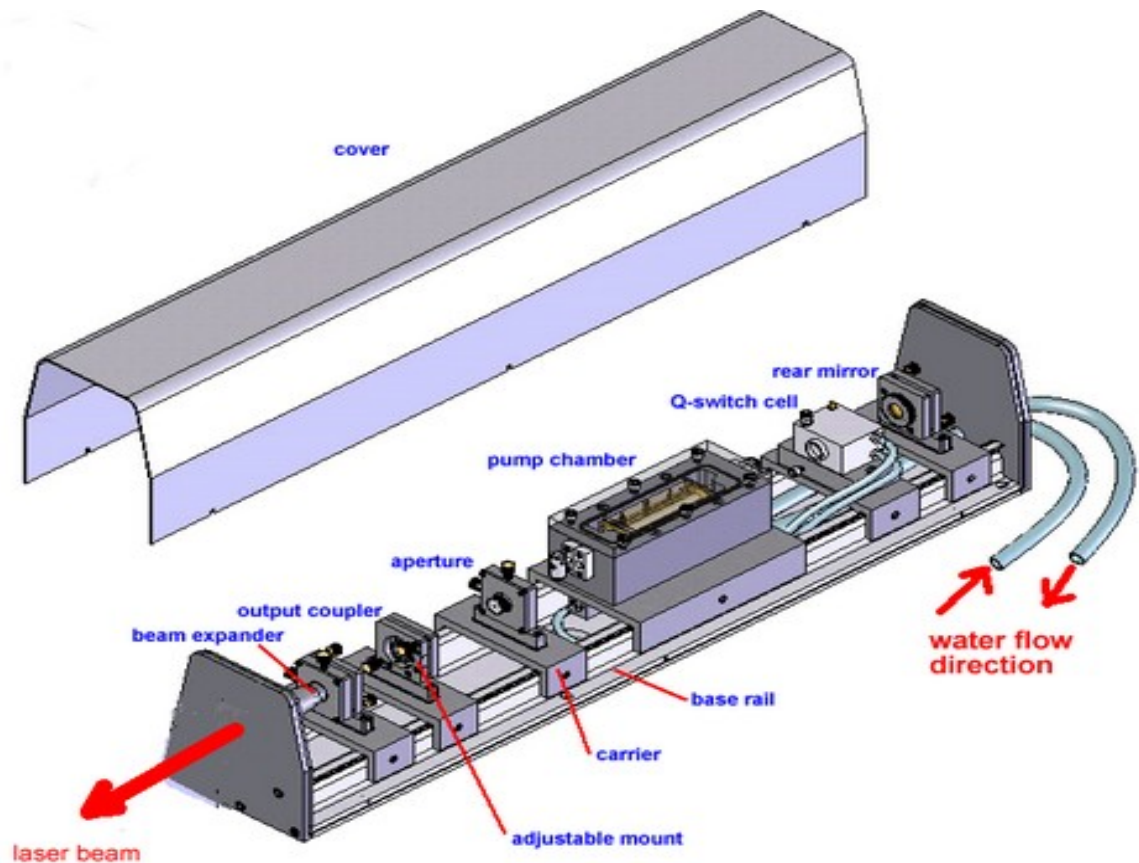


Figura 11: Vista general del Láser.

El haz láser es entonces dirigido, hacia los **Generadores de Segundo y Tercer Armónico (SHG y THG)**, donde sufre un proceso óptico no alineado, en el cual los fotones interactúan con un material, sufren una combinación y forman nuevos fotones con mayores energías (el doble para el SHG y el triple para el THG), mayores frecuencias (frecuencia del láser es de 20Hz), y por tanto longitudes de onda más pequeñas. Esta longitudes de onda serán de 532nm para SHG y de 355 para THG (Ver Fig. 12 y 13).

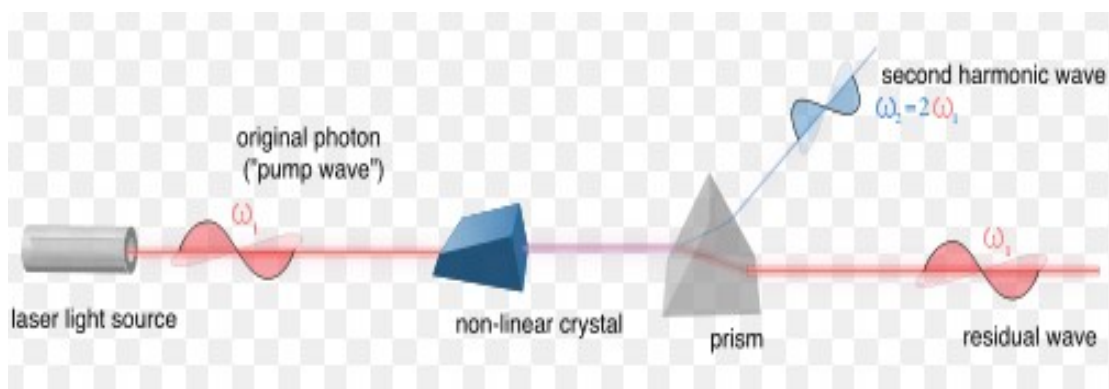


Figura 12: Detalle Generador SHG.

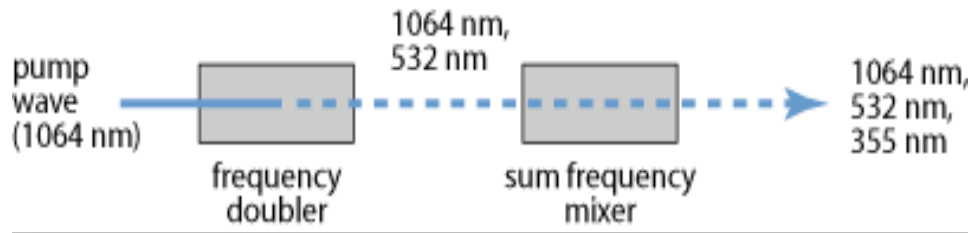


Figura 13: Funcionamiento Generadores SHG y THG.

Tras los generadores armónicos el láser pasa a un compartimento que rebota el haz hacia otro compartimento donde se encuentra un aparato llamado **Oscilador Óptico Paramétrico (OPO)**, y un conversor de frecuencia. El primero está formado esencialmente por un resonador óptico y un cristal óptico no alineado, y que como su nombre indica, es un oscilador paramétrico (oscilador armónico cuyos parámetros oscilan temporalmente) que oscila en frecuencias ópticas. Convierte una entrada de ondas láser (llamadas “pump”) con una determinada frecuencia en dos ondas con frecuencias más bajas. La suma de las dos longitudes de onda de salida (una en el rango visible; VIS y otra en el rango del ultravioleta; UV) dan 710nm.



Figura 14: Compartimento del OPO, y detalle de tornillo-motor micrométrico.

Tras el OPO, podemos encontrar otro Generador de Segundo Armónico (**SHG**) y el **Conversor de Frecuencias (SFM)**, al que para el caso de medidas de NO_2 llegan las longitudes de onda en el rango del visible del OPO, y se combinan con longitudes de onda de 1064nm para dar lugar a las longitudes de onda buscadas (de 355nm a 398nm), para que puedan ser absorbidas por el elemento en cuestión. En nuestro

caso, para el dióxido de azufre no es necesario la combinación con longitudes de onda de 1064nm, ya que las longitudes de onda buscadas son menores (del orden de 280nm a 290nm).

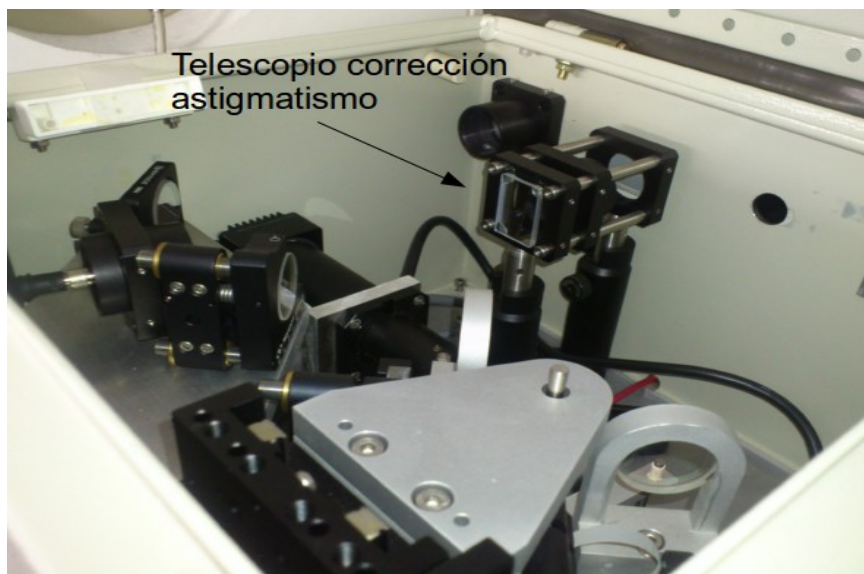


Figura 15: Conversor de frecuencias y detalle de telescopio de corrección

Tanto el OPO como el conversor de frecuencias están equipados con unos motores de precisión de alta velocidad para realizar cambios rápidos de longitudes de onda de 2nm. Las secuencias de longitudes de onda de más de 16 elementos pueden ser realizadas en menos de un segundo. Cada una de las longitudes de onda emitidas es continuamente estabilizada con un **Espectrómetro** calibrado. Este aparato es instrumento que sirve para medir las propiedades de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético. La variable que se mide es la intensidad luminosa y la variable independiente será la longitud de onda de la luz en nanómetros. Este aparato se encuentra localizado en el interior del compartimento del Láser justo después del láser, y tiene dos entradas de fibra; una para el rango del UV y otra para el rango del VIS.

A continuación, el haz de longitudes de onda seleccionado pasa por distintos espejos hasta el **Telescopio de Corrección de Astigmatismo** (Ver Fig.15), para enfocar el haz hasta pasar hacia un **Expansor (Beam Expander)** (Ver Fig. 16), ya que las aplicaciones láser para mediciones atmosféricas requieren de diámetros de haz mayores que los producidos por la salida de un láser común. Además, es necesario disminuir la divergencia* del haz (*medida angular del incremento en el diámetro del haz con respecto a la distancia desde la apertura óptica o la apertura de la antena desde donde emerge el haz), para mantener la potencia tan confinada como sea posible sin que las grandes distancias recorridas influyan excesivamente. Por otra parte, la alta energía en un diámetro de haz tan reducido produce

interacciones indeseables con la atmósfera (especialmente a bajas alturas), por lo que un expansor de haz aumenta dicho diámetro disminuyendo estas interacciones.

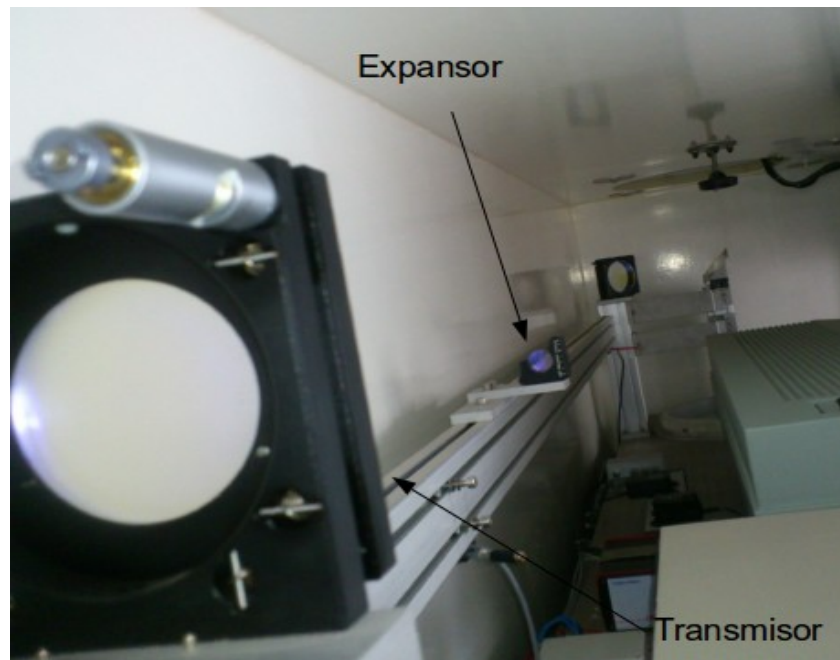


Figura 16: Detalle del Transmisor en primer plano y del Expansor al fondo.

Y por último, tenemos un **Transmisor Óptico**, que lanza el haz láser fuera del vehículo después del expansor, a través del **Periscopio** (Ver Fig.16).

En la etapa de recepción, todas las longitudes de onda transmitidas, son recibidas a través del periscopio, por un único receptor, llamado **Fotomultiplicador (PMT)**, el cual una vez la luz entra al cátodo fotoemisor, convierte la energía de la luz incidente en fotoelectrones emitidos al vacío, los cuales son enfocados hacia los dínodos* (*multiplicador de electrones), donde son multiplicados en un proceso de emisión secundaria. Al final, la señal de salida se obtiene en el ánodo. La eficiencia en la conversión o sensibilidad del cátodo, varía con la longitud de onda de la luz incidente. La relación entre la sensibilidad del cátodo y la longitud de onda se llama respuesta espectral característica. Debido a la mencionada emisión secundaria de cada dínodo, el tubo fotomultiplicador tiene una alta sensibilidad y un bajo ruido. Este detector (PMT), es capaz de registrar los datos, y digitalizarlos. Las señales son pulso a pulso transferidas al ordenador principal y clasificadas individualmente para cada longitud de onda. El tiempo medio es de 10 segundos a 5 minutos para cada haz.

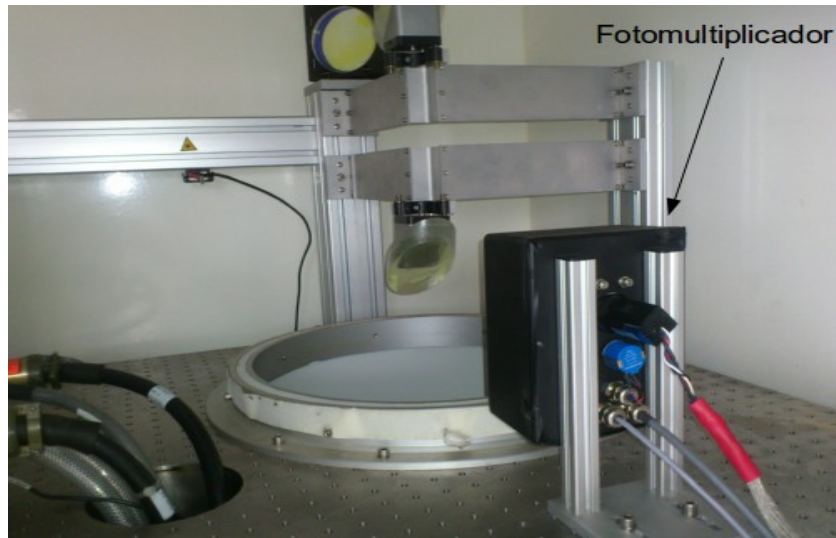


Figura 17: Detalle del Fotomultiplicador (PMT).

El equipo está montado sobre una plataforma de metal en “breadboard”. El láser Nd-YAG, el OPO, el Conversor de Frecuencia, las Transmisores ópticos y el Telescopio Receptor (PMT), están todos integrados sobre esa plataforma. El sistema óptico está contenido en un compartimento protegido con control individual de temperatura, sin intercambio de aire con el compartimento del operador. El compartimento óptico, el del operador, el electrónico y el sistema de refrigerado están bien aislados y con aire acondicionado dentro del chasis del camión. El periscopio para escaneado angular 2D está instalado independientemente en el techo del vehículo, como puede observarse en la figura 18.

3.4.2. El sistema externo



Figura 18 : Vista delantera-derecha del vehículo Lidar.



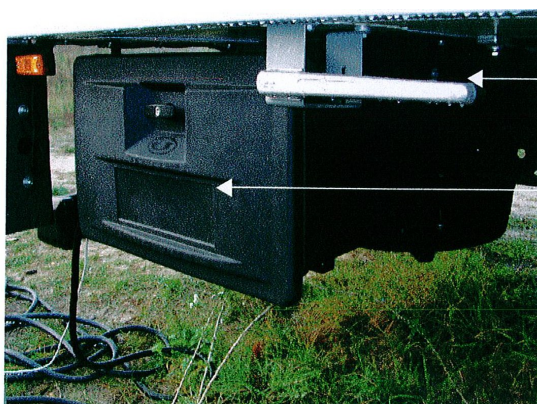
- Air conditioning of operation room
- Window with sun protection jalousie
- Entrance door of the operation room
- Air outlet of the cooling unit
- Current entry box
- Movable ladder to the operation room

Figura 19: Vista delantera-izquierda del vehículo Lidar.



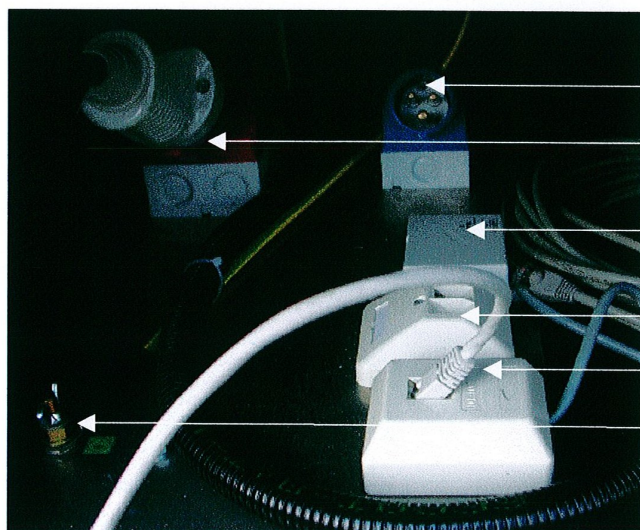
- Entrance doors to the machinery room
- Air inlet of the cooling unit
- Movable ladder to the machinery room
- Tow bar

Figura 20: Vista trasera del vehículo Lidar.



- Door holder in drive/parking position
- Current entry box

Figura 21a: Caja de entrada de corriente eléctrica y demás conexiones (caja cerrada).



16A connection (blue socket)

32A connection (red socket)

Lightning protection (modem)

Phone line connections

Network connection (LAN)

Earthing rod connection

Figura 21b: Caja de entrada corriente eléctrica y demás conexiones (caja abierta).

3.4.3. El sistema interno



Optics and laser compartment

Electronics compartment

Figura 22: Vista de los compartimentos óptico y electrónico (en el interior del Lidar).

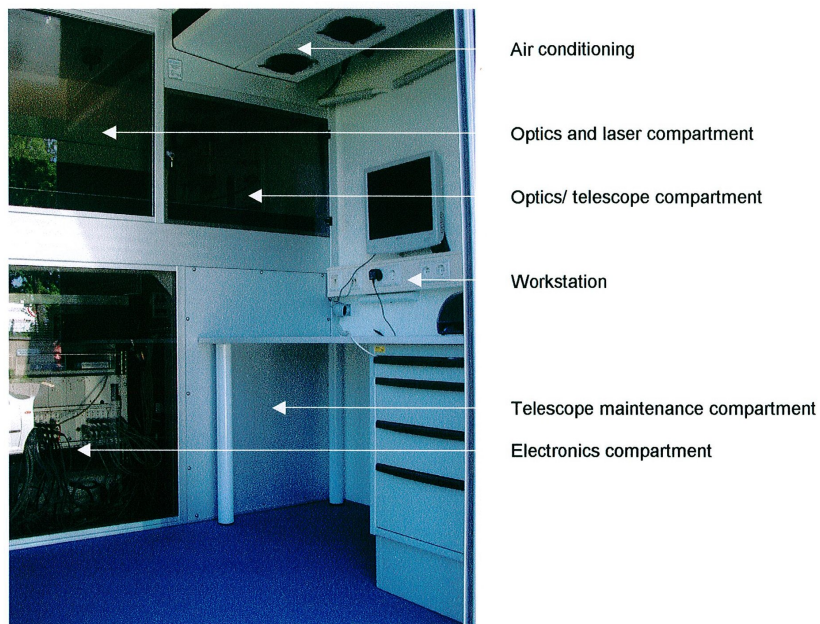


Figura 23: Vista de los compartimentos óptico, electrónico, de la zona de trabajo y del AC.

3.4.4. Puesta en marcha del Lidar (Conexión)

1. Conexión de todos los enchufes necesarios (ver Fig. 21b). En caso de usar un generador de energía usar y conectar la toma de tierra.
2. Comprobar nivel de agua del depósito del circuito refrigerador, y en caso correcto conectar el sistema de refrigeración del láser (Ver Fig. 24).



Figura 24: Control del sistema de refrigeración del Láser.

3. Seleccionar el voltaje con el selector de voltaje principal.



Figura 25: Selector de Voltaje.

4. Determinar el orden de las fases.

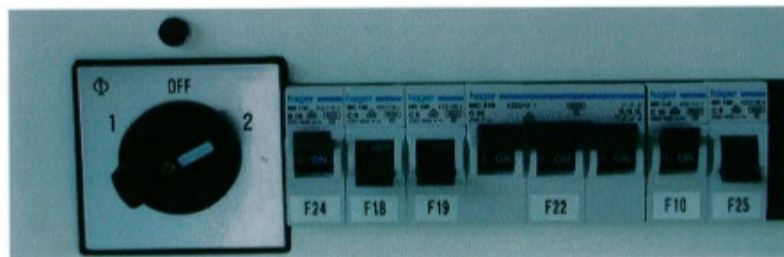


Figura 26: Selector de fases con luces LED de emergencia y fusibles.

5. Armado del sistema eléctrico.

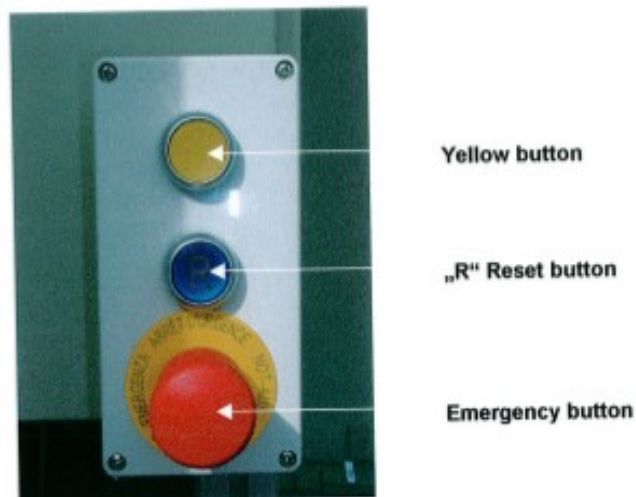


Figura 27: Botones de emergencia y reinicio (cabina eléctrica).

6. Enchufar todos los fusibles necesarios del panel eléctrico (Ver Fig. 28).

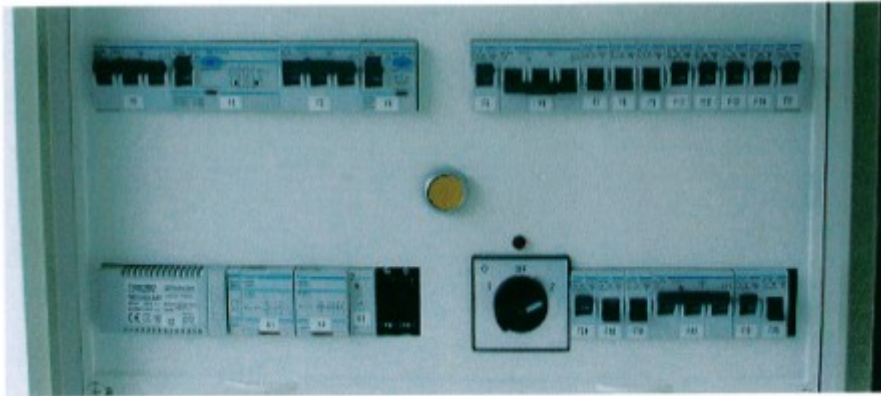


Figura 28: Panel eléctrico, parte superior.

- 7.** Presionar el botón amarillo (Ver figura 27).
- 8.** Presionar el botón de reinicio (Ver Fig. 27).
- 9.** Revisar las luces de emergencia del selector de fases(Ver Fig. 28).
- 10.** Supervisar el procedimiento de puesta en marcha observando el panel para que no existan señales de emergencia.

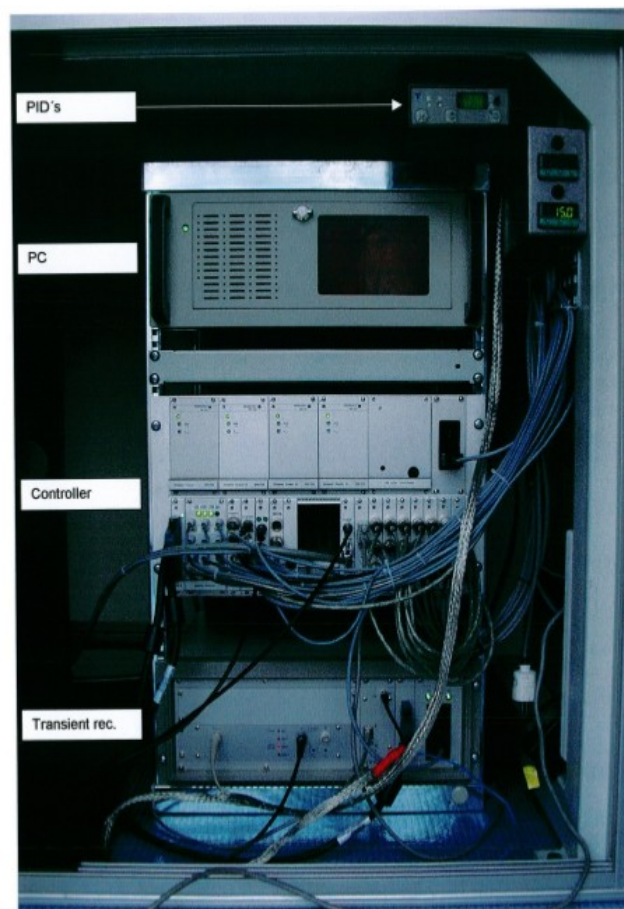


Figura 29: Sistema electrónico (Vista completa).

3.4.5. Descripción del Periscopio

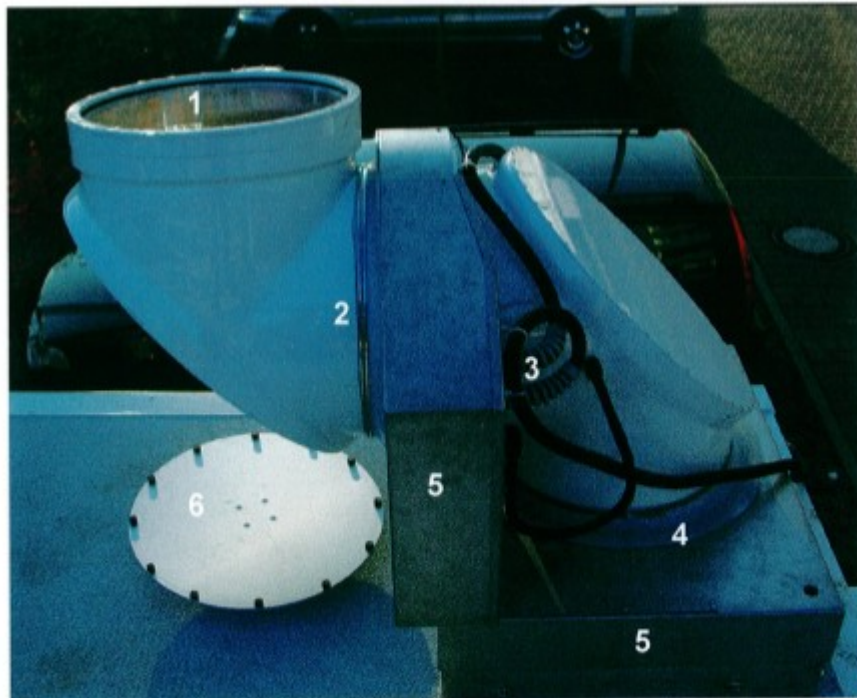


Figura 30: El periscopio (1: ventana, 2: eje zenith, 3: cableado, 4: eje azimuth, 5: cajas de motores, 6: plataforma de seguridad para transporte – la cámara no se muestra aquí).

El periscopio es un conjunto de mecanismos automatizados que permiten hacer escaneos tanto verticales como horizontales del cielo. El rango de movimientos permite escanear casi 360° horizontalmente y sobre 285° verticalmente. El operario puede mover el periscopio paso a paso gracias al software de control del motor o puede hacer un escaneo moviendo el periscopio paso a paso en intervalos de tiempo elegidos previamente.

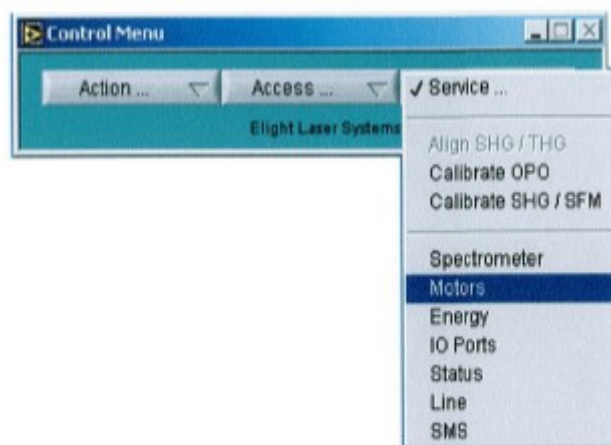


Figura 31: Software control Lidar con menú Motores seleccionado.

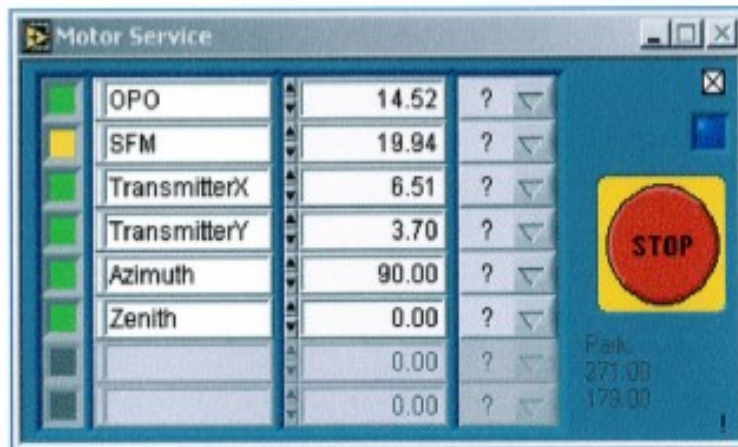


Figura 32: Ventana de software de control de motores (para mover el periscopio se debe de editar el Azimuth y el Zenith).



Figura 33: Detalle del periscopio activo. Sobre el se puede observar la cámara (1).

GUÍA DE FUNCIONAMIENTO DEL PERISCOPIO

Para el seguro funcionamiento del periscopio, se deben seguir las siguientes pautas para no permitir ninguna operación que cause daños materiales o humanos;

- Quitar funda protectora del periscopio.
- Liberar la ventana del periscopio de la plataforma de protección para transporte, girando la manivela que hay dentro del Lidar en el techo del compartimento óptico.
- Subir al techo del camión para comprobar el liberado.
- El periscopio empezará a funcionar si en el campo Zenith se seleccionan distintos valores en la ventana Motor Service. (Ver Fig. 32)

- Los ángulos zenith (vertical) son: -271° posición de conducción (aparcado de periscopio); -90° horizontal (a un lado); 0° vertical; $+90^\circ$ horizontal (al otro lado). Para comenzar a operar el zenith se debe llevar a 0° , y ya se podrá trabajar horizontalmente (azimut).
- Usar el botón Stop en caso de error o peligro.
- Azimuth: las posiciones de conducción/aparcamiento es 179° ; los rangos van de -55° a 210° ,
- Por tanto, la posición de aparcamiento es de A: $271,00^\circ$ y Z: $179,00^\circ$.

Según las pruebas realizadas desde el punto previsto para la medición de las emisiones de dióxido de azufre de los barcos, en las dársenas del Puerto de Cartagena, situado en el parking delantero de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la UPCT (Ver Fig. 34), los valores aproximados estimados para Azimut y Zenit, son los siguientes:

Estacionamiento Tipo de Barco	Valor Azimut (en grados)	Valor Zenit (en grados)
Crucero	117,00	92,00
Carguero	77,00	93,00

Tabla 3: Valores de Azimut y Zenit estimados para posicionar el periscopio para mediciones de dióxido de azufre.



Figura 34: Vista aérea del punto de medición previsto.

3.5. CONTROL DE SOFTWARE

3.5.1. Menú Principal Software

Cuando el ordenador ha sido encendido, el software de control de seguridad da la orden para que de comienzo el procedimiento de puesta en marcha automático. El control de seguridad, a continuación comprueba las temperaturas y los detectores de humo en el sistema, y en caso de detectar algún peligro activará una alarma y apagará el sistema.

El menú principal se encuentra en la vía *Windows start menu: Start - programs - Elight - UV11 Control*. La pantalla de "Control Menu" aparecerá (Ver Fig. 34).

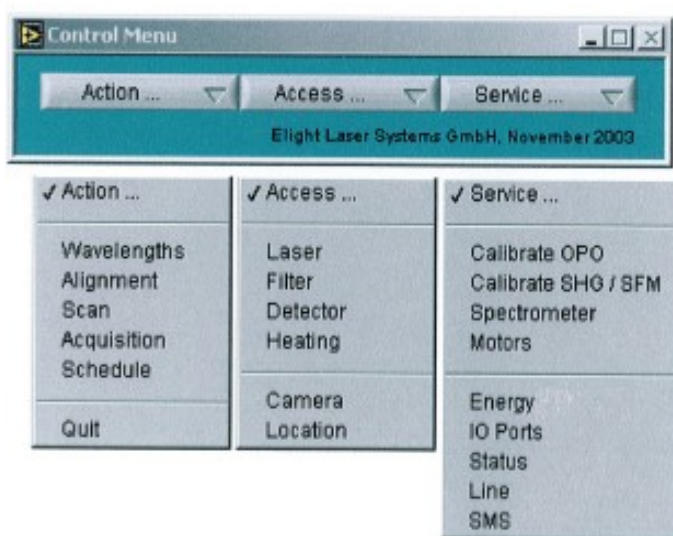


Figura 35: Menú principal y submenús. a) Action, b) Access, c) Service.

La estructura del menú principal está hecha para distinguir entre a) los principales niveles de cada procedimiento de medida (menú **Action**), b) el control necesario de las diferentes unidades del sistema (menú **Access**), y c) el resto de los controles necesarios para el mantenimiento y trabajos de verificación (menú **Service**).

3.5.2. Control del Láser

El controlador del láser se encuentra vía *Access...Laser* (Ver Fig. 35).



Figura 36: El controlador Láser.

En la figura 28 se observan tres submenús: **Manual**, **Auto** y **Crystals**. Las dos primeras opciones se refieren al modo en que se quiere controlar el Láser, y aunque se puede controlar de manera manual, nos centraremos en el controlado automático.

En el **Modo Auto**, el software dirigirá todas las operaciones, los tiempos de calentamiento del mismo y algunas consideraciones de seguridad. El botón *STOP* es para parar la radiación láser y los pulsos de flasheado de las lámparas. Es aconsejable empezar en el modo automático, para que mientras el láser vaya calentando, el operario prepare el resto de las operaciones del sistema necesarias para la medida.



Figura 37: Visión general del panel de interruptores control de láser.

En cuanto al **Submenú Crystals** da acceso al motor de control de los cristales SHG y THG (generadores del segundo y tercer armónico, respectivamente) en el láser (Ver Fig. 36). Estos controles están basados en posiciones relativas; sus posiciones son 0 cuando el software arranca, ya que mantiene la posición de la última sesión donde se obtuvo el máximo de energía, posición que se mantendrá cercana al operar el equipo de nuevo . Se pueden controlar las posiciones también paso a paso usando los respectivos controles que hay junto a los valores, o introduciendo un valor directamente y pulsando el botón Intro del ordenador. En este caso, el motor se moverá a 2 pasos por segundo. La optimización de las posiciones, no deberá hacerse para más de 20 pasos. La precisión para encontrar la mejor posición será de 1 a 3 pasos.



Figura 38: Ventana de control de cristales del control de láser.

En la misma figura podemos encontrar el inhabilitador del obturador automático de seguridad. El símbolo **-.*** (como cerrando un ojo) muestra el estado de “*inhabilitado seguridad visual*”, mientras que **o.o** (como una simple mirada) es para habilitar la seguridad visual (obturador). Este último caso es el utilizado por el ordenador para iniciar el software.

El obturador de seguridad mostraría cerrado el emisor del haz del Lidar si hay algún obstáculo con el que pueda colisionar el haz emitido. Durante algunas alineaciones propuestas, sin embargo es necesario inhabilitar esta función. El sistema puede operar sin el obturador de seguridad.

3.5.3. Control de motores

Siguiendo la vía *Service...Motors* encontramos *Motor Service* (Control de motores, ver Fig. 32).

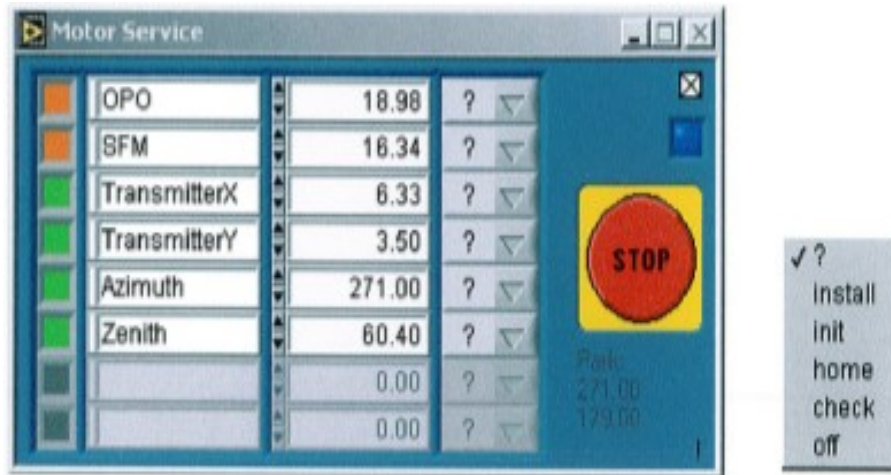


Figura 32: Ventana Motor Service y detalle de submenú de cada uno de los motores. (Figura repetida)*.

En la ventana se puede observar el listado de motores, los motores para el control de longitudes de onda OPO y SFM, los del transmisor, y los del periscopio (Azimuth y Zenith). Cada uno de estos motores serán dirigidos desde este software hacia la posición o valor deseado. Para eso, una vez se introduce el dato deseado se presiona el botón Intro del pc. El botón *STOP* sirve para parar todos los motores que aparecen en la ventana.

Los valores mostrados son unidades de grados para el periscopio, y en unidades de milímetros en el tornillo micrométrico para los otros motores.

La primera acción para la que se usa este comando es para dirigir el periscopio.

Debajo del botón Stop se puede encontrar información sobre la localización del aparato en el momento de su uso. En este caso, para tener una mejor orientación de donde se encuentra el aparato, es posible conectar el monitor de la cámara vía *Access...Camera*, para ver la dirección que toma una vez dirigido el periscopio. Durante la recogida de datos es preferible que esta opción se desconecte si no es necesaria para que la capacidad del procesador de dato no se merme.

Para cada motor hay un menú concreto para acceder a diversas funciones especiales (Ver Fig. 39).

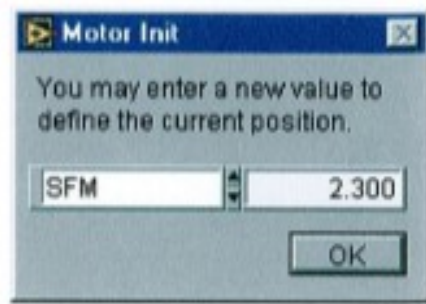


Figura 39: Detalle de Inicio de Motor SFM.

Lo más importante de estas funciones es la opción **Init**, que te permite redefinir la posición actual del motor. Esto será útil para cuando el número mostrado no se corresponda exactamente con la posición real del motor, especialmente los tornillos micrométricos.

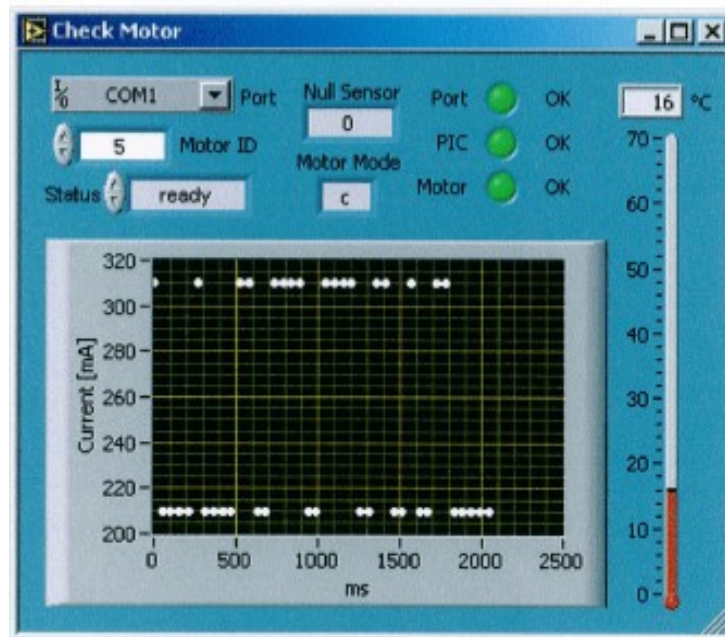


Figura 40: Ventana del submenú de los motores Check Motor.

Otra opción es el **Check** de los motores (Ver Fig. 32), de la cual se obtiene información detallada sobre el estado del motor. Se puede obtener información sobre la electricidad o corriente que llega al motor en una determinada posición y de esta forma saber si se ha bloqueado o no.

El menú **Home** (Ver Fig. 32) se usa para recalibrar la posición del motor del periscopio en sus posiciones de movimiento límites. Hay que asegurarse de usar Home, para el zenit solo si el azimut está cerca de su posición de estacionamiento, y

usar el *home* para el azimut solo si el zenith está por encima de la posición horizontal (-90...+90°). Esta opción no puede ser usada para otros motores.

La opción **Off** se usará para la alineación manual de los motores de los transmisores. Si se pulsa *off* de nuevo, al mismo tiempo que cambia la posición real será fijada. Usando *Init* se cambia de nuevo, y se introduce la nueva posición que se desee.

En la parte izquierda de la ventana de Motor Service (Ver Fig. 32), se puede observar unos pequeños cuadrados que cambian de color según el estado del motor. Los colores son definidos de la siguiente forma:

COLOR	ESTADO DE MOTOR
Verde	Preparado
Amarillo	Funcionando
Naranja	En movimiento
Azul	Punto de inicio
Negro	Apagado
Gris	Indefinido

Tabla 4: Correspondencia de colores con estado de moto en Ventana *Motor Service*.

3.5.4. GPS y Brújula

El sistema está equipado con un GPS, una brújula electrónica y una plomada. Para empezar con este software se accede a través de *Access...Location* (Ver Fig. 35).

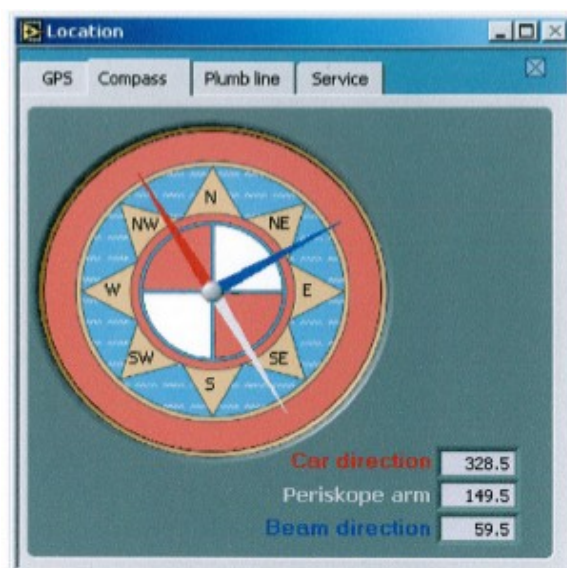


Figura 41: El monitor de la brújula.

El monitor de la **brújula** (Ver Fig. 41) tiene tres puntos que muestran la orientación del camión, la dirección del brazo del periscopio y la dirección hacia donde mira el periscopio.

Para operar con la **plomada** es necesario abrir completamente el primer cajón del mueble de la mesa de trabajo del operario, dónde se encuentra el dibujo con el gráfico a escala (Ver Fig. 42) para comprobar la plomada que nos indica la horizontalidad del equipo.

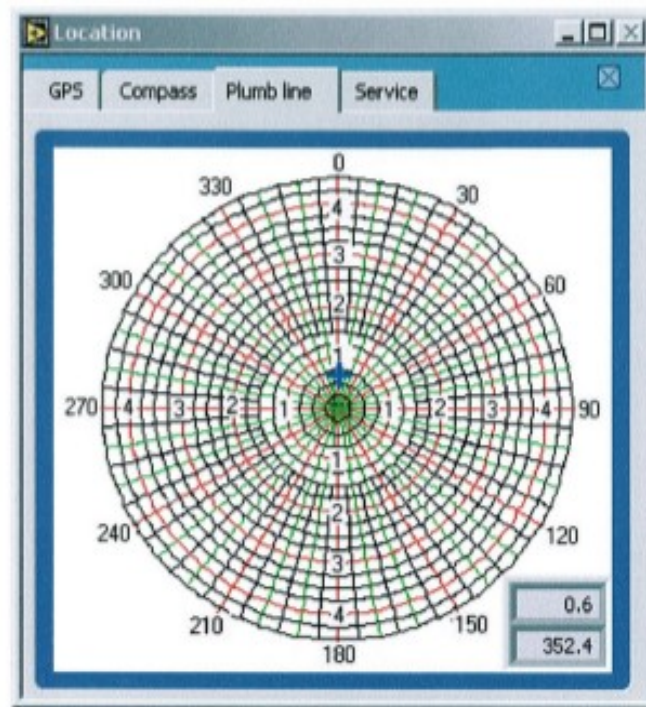


Figura 42: Detalle del gráfico escalado para la plomada.

La plomada señalará una cierta posición en la escala. Según indique la plomada, se debe decidir si se usa el estabilizador hidráulico para poner el camión en posición más o menos horizontal. Por último, se leerá la posición de la plomada y se introducirá moviendo el cursor a la posición en su respectiva escala en el software. Los resultados de inclinación y dirección de la plomada serán mostrados como números también.

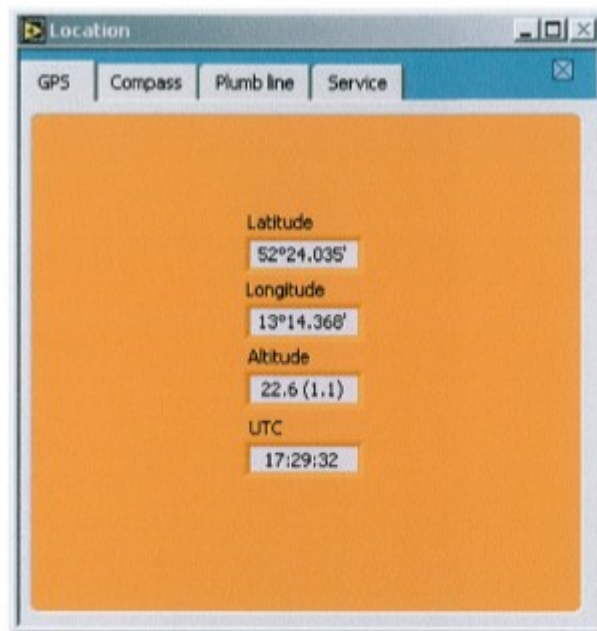


Figura 43: El monitor localizador GPS.

En la Figura 43 se muestra la lectura del monitor GPS. Los valores de latitud y longitud serán guardados junto con los demás valores.

Existe un monitor de notificaciones para el GPS y la brújula. Cualquier error con los puertos se expresará mediante señal luminosa-LED en color rojo (Ver Fig. 44).

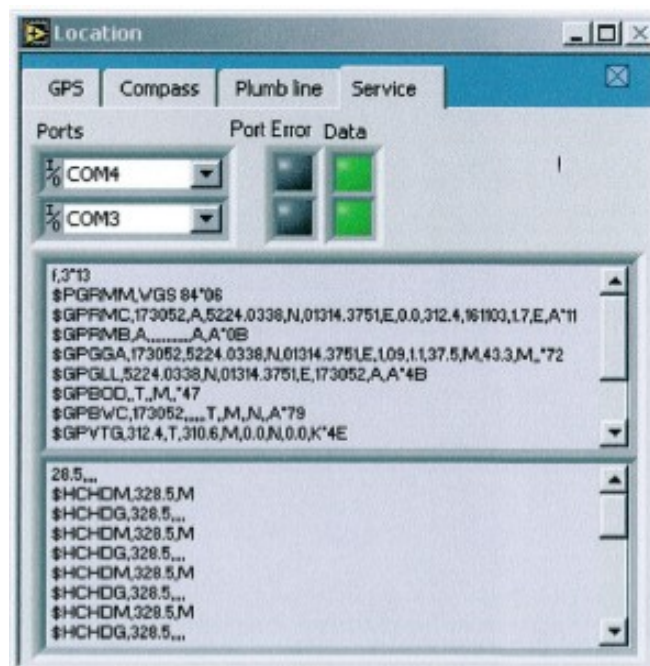


Figura 44: El monitor de Service para el GPS y la brújula.

Tanto el localizador GPS como la brújula se usan para determinar la posición geográfica donde se encuentra estacionado el vehículo a la hora de realizar la medida y, obtener a su vez información de la dirección y velocidad de las masas de aire predominantes, y de las masas de carácter excepcional en la zona, para una vez estudiada esta información, planear las direcciones hacia donde se dirigirán las medidas, dependiendo de la movilidad de los barcos y sus correspondientes penachos de emisión.

3.5.5. Control de longitudes de onda

a) El espectrómetro

El control de las longitudes de onda emitidas se lleva a cabo mediante un espectrofotómetro. Este aparato está situado detrás del láser. Tiene dos entradas de fibra: una para el ultravioleta (UV) y otra para el canal visible (VIS), y está conectado al equipo informático mediante puerto USB.

Antes de empezar con el control de las longitudes de onda, hay que asegurarse de que las posiciones de los motores del OPO y SFM se corresponden con los valores mostrados en la ventana de Motor Service (Ver Fig. 32).

Para verificar el correcto funcionamiento del láser, OPO y espectrómetro es necesario abrir el obturador a 355nm (a la mitad) y verificar que se pueden ver algunos rayos de luz dispersados de algún color detrás de los módulos ópticos. Hay que abrir la ventana del espectrómetro *Vía Service....Spectrometer* (Ver Fig. 35), en la que se debería observar un pico espectral en verde (VIS). Aunque también se observan pequeños picos en azul-violeta del UV, en la ventana UV+VIS (Ver Fig. 45).

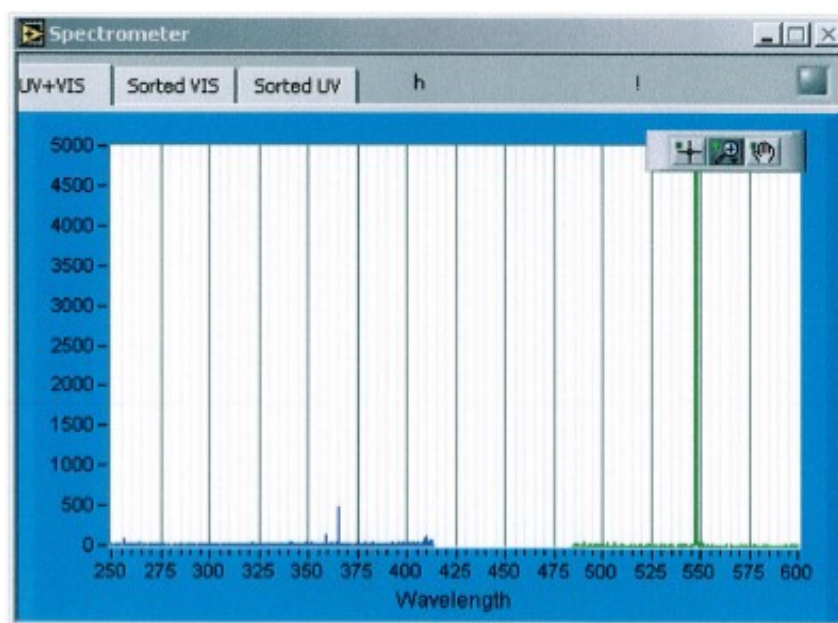


Figura 45: Monitor de datos del espectrómetro.

b) Calibración del OPO

Una condición necesaria para el éxito del control de las longitudes de onda es la calibración del motor de posición del OPO frente a las longitudes de onda VIS del emitidas por el OPO. Esta calibración no cambiará bajo condiciones normales pero sí, si algún trabajo mecánico se ha realizado al motor, o la alineación del OPO ha sido cambiada.

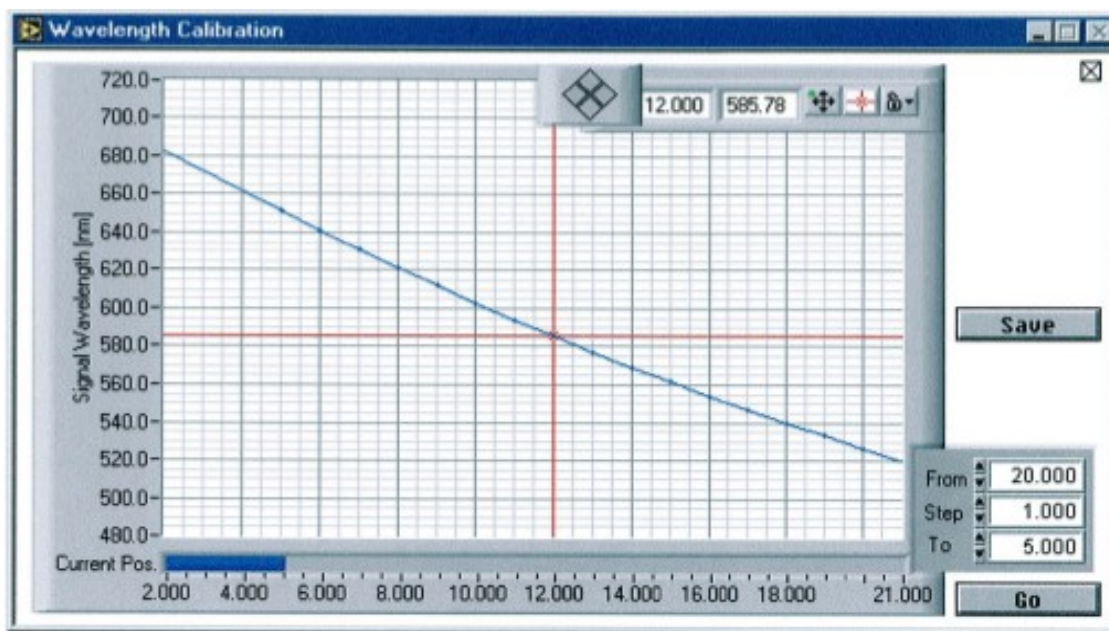


Figura 46: Calibración de las longitudes de onda OPO.

La ventana de calibración de longitudes de onda para OPO se encuentra *Vía Service...Calibrate OPO* (Ver Fig. 32 y 46). La pantalla muestra la calibración de este motor. Para hacer una nueva calibración se deben introducir los parámetros (**From, Step, To**), en unidades en milímetros en el tornillo micrométrico, como en control de motores (Motor Service). Al presionar el botón GO empezará el escaneado que durará unos pocos segundos. Para parar el escaneado se le debe dar de nuevo a GO. Al final del escaneado, la nueva calibración será automáticamente grabada. Se debe comprobar que no existan problemas con el resultado, y si es así, se puede seleccionar otro rango de escaneado.

La calibración del OPO, no juega un papel de importancia para la calidad de las medidas LIDAR, para el caso de las determinaciones de Ozono. Es solamente una necesidad técnica para la realización del control de las longitudes de onda. Es un proceso que estabilizará las longitudes de onda reales a valores deseados, de manera on-line y de alta precisión. Sin embargo, sí es de suma importancia para la cuantificación de dióxido de azufre

c) Calibración SFM

Antes de de la calibración SFM, los respectivos cristales (SHG o SFM) deben ser seleccionados. Esto se hace mediante la elección de una secuencia de longitudes de onda en el control de longitudes de onda (Ver Fig. 49). El sistema elevador de cristales, colocará el cristal adecuado para la aplicación seleccionada, SFM para NO₂ o SHG para el resto de contaminantes, incluido el SO₂.

Se cierra la ventana de control de longitudes de onda y se abre la calibración SHG/SFM *Vía Service...Calibrate SHG/SFM* (Ver Fig. 47).

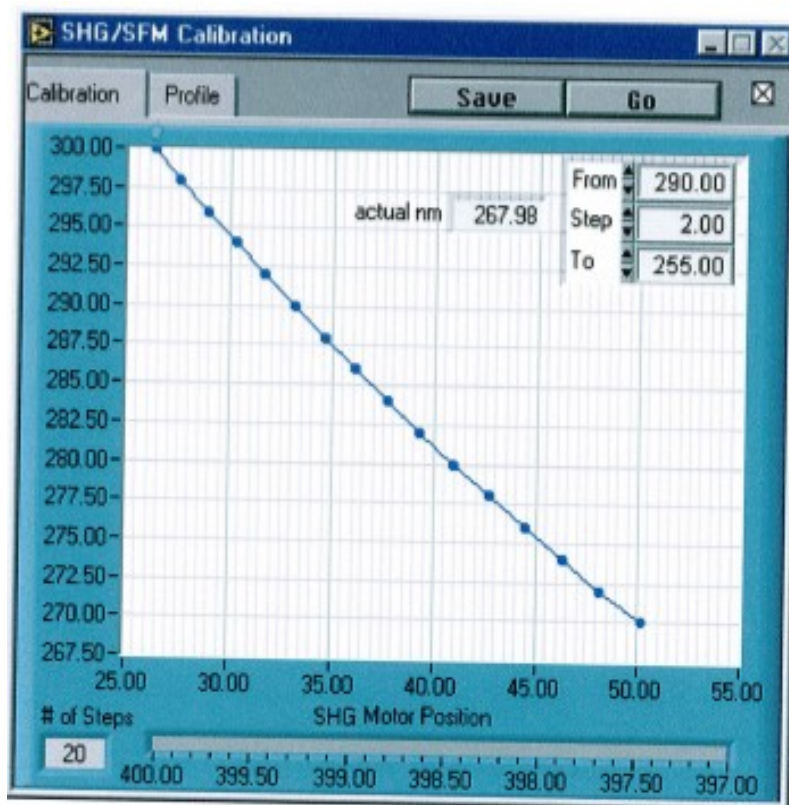


Figura 47: Ventana para calibración SHG/SFM.

El rango para el escaneado de calibración será en nanómetros en el rango del UV. El escaneado por defecto (desde 290.00nm baja a 255.00nm en pasos de 2.00nm).

El procedimiento empieza cuando se presiona el botón *GO*.

En la ventana *Profile*, se puede observar si una buena fase es encontrada (Ver Fig. 48). Se puede observar la lectura del espectrofotómetro en sus curva azul al mismo tiempo (Ver Fig. 45) También se puede tomar un trozo de papel blanco y colocarlo enfrente del espejo del transmisor para visualizar si la radiación UV está siendo producida.

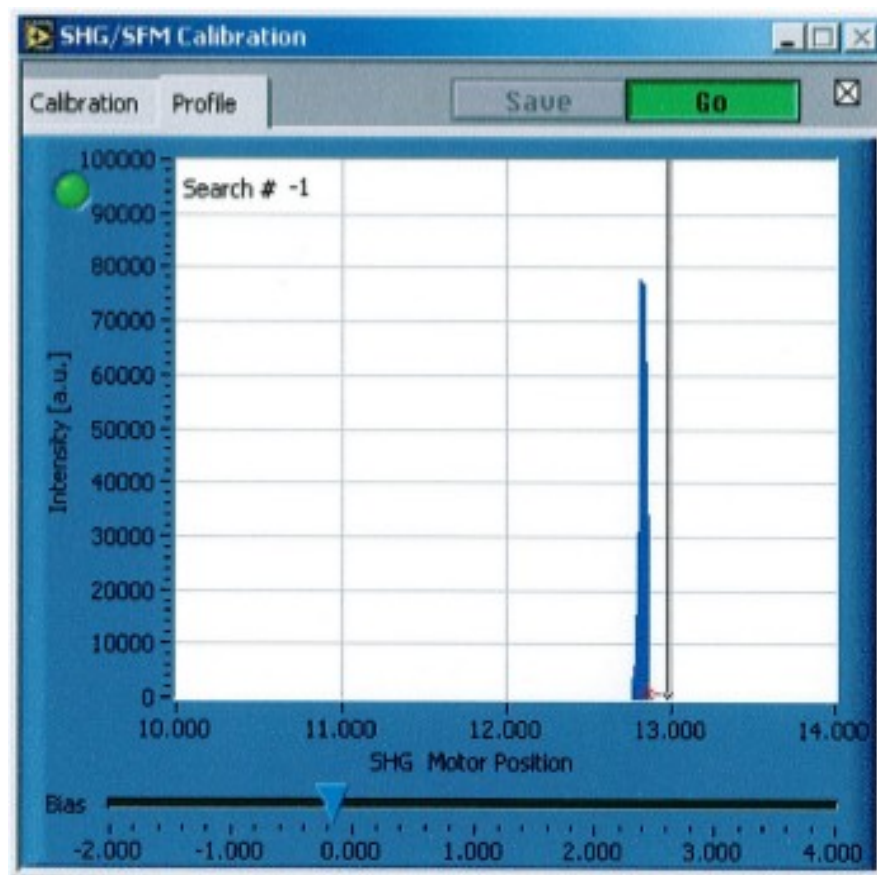


Figura 48: El perfil durante el proceso de calibración SHG.

Cuando uno de los escaneados es finalizado o interrumpido, el resultado puede verse en la ventana *Calibration* (Ver Fig. 47). El resultado puede ser guardado presionando el botón *SAVE*.

d) Control de las longitudes de onda OPO

Mediante la vía *Action...Wavelengths* se puede acceder a la ventana de control de longitudes de onda. El software preguntará para seleccionar una de las disposiciones predefinidas de las secuencias de longitudes de onda.

Una vez seleccionada, el control de longitudes de onda fijará las longitudes de onda deseadas y empezará la secuencia para los motores del OPO y el SFM. En la etiqueta *Wavelength Control*, las longitudes de onda reales registradas por el espectrofotómetro serán mostradas (puntos rojos) junto con las longitudes deseadas (puntos amarillos); Ver Fig. 49.

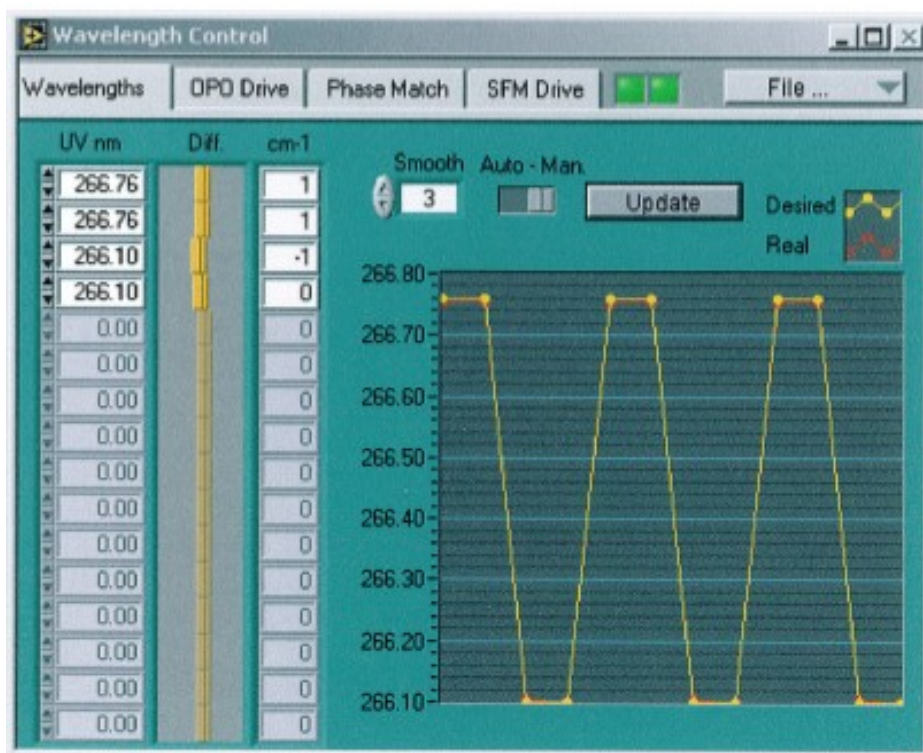


Figura 49: Controles y demostración para la secuencia OPO.

Probablemente, las longitudes reales, al principio no se corresponderán con los valores deseados. La calidad del resultado se mostrará como una lista de desviaciones (en valores de longitudes [cm^{-1}]), y también gráficamente como curvas y por dos indicadores luminosos LED verdes, que certifican que todo ha ido bien (todo mejor que 8cm^{-1}) y excelente (todo mejor que 4cm^{-1}).

e) Control dinámico SFM

El control de la fase-combinación de los cristales del SHG o del SFM es un proceso bastante complicado que requiere una compensación de toda la secuencia del cristal. El procedimiento es controlado por la ventana *Phase Match* (Ver Fig. 49).

Al principio, una búsqueda de 0.300nm debería ser suficiente. Presionando el botón GO, la secuencia de movimiento para el motor SFM debería ser en pequeños pasos, para que vayan ocurriendo las lecturas del espectrofotómetro UV. Un escaneado completo dura alrededor de 1 minuto. Los resultados pueden observarse en un conjunto de curvas, una para cada secuencia de longitudes de onda. Después del escaneado, o si se para el escaneado, se mostrará el *SFM Drive* con las correcciones propuestas (Ver Fig. 51). Esos valores pueden ser modificados manualmente. Para optimizar la secuencia hay que presionar el botón *Apply*. Como para la secuencia

OPO, este procedimiento necesita ser hecho como una repetición.

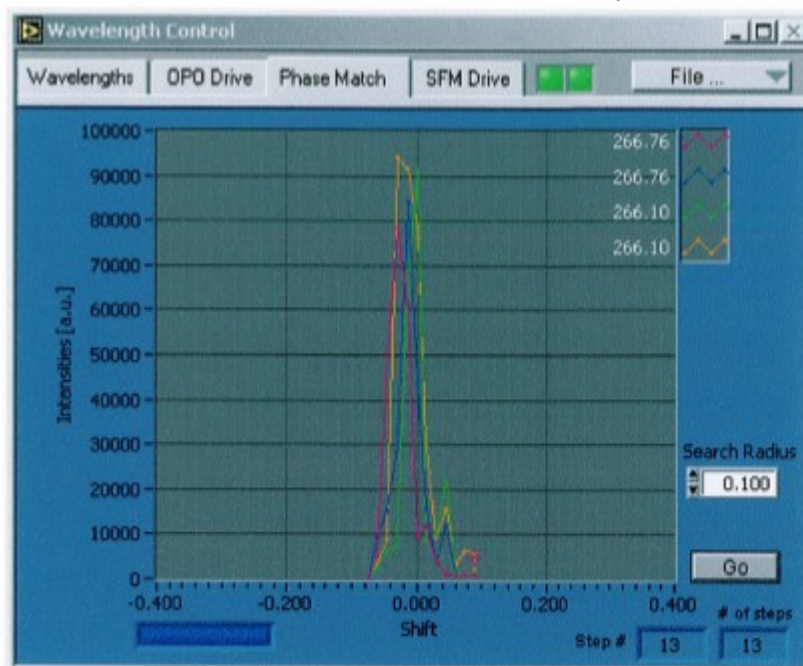


Figura 50: Controles para la fase de escaneado.

La figura 49 muestra que el máximo de todas las curvas se dio en *Shift* (desplazamiento) 0.000; esto significa que no hace falta una nueva corrección. Como el ángulo aceptado para los cristales SHG y SFM es más grande que el ancho de banda y la precisión del control OPO, esta secuencia no es objeto de observación continua y optimización durante el proceso de medida como se hace el control de longitudes de onda del OPO.

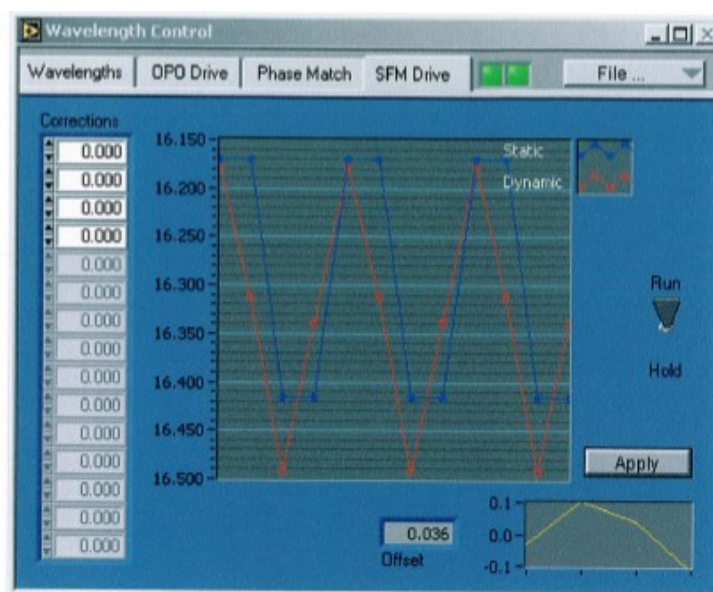


Figura 51: Ventana SFM Drive para el control dinámico SFM.

f) Visualizaciones del espectrómetro

Cuando el control de longitudes de onda es activado, el software del espectrómetro ofrece información más detallada como muestran las siguientes figuras.

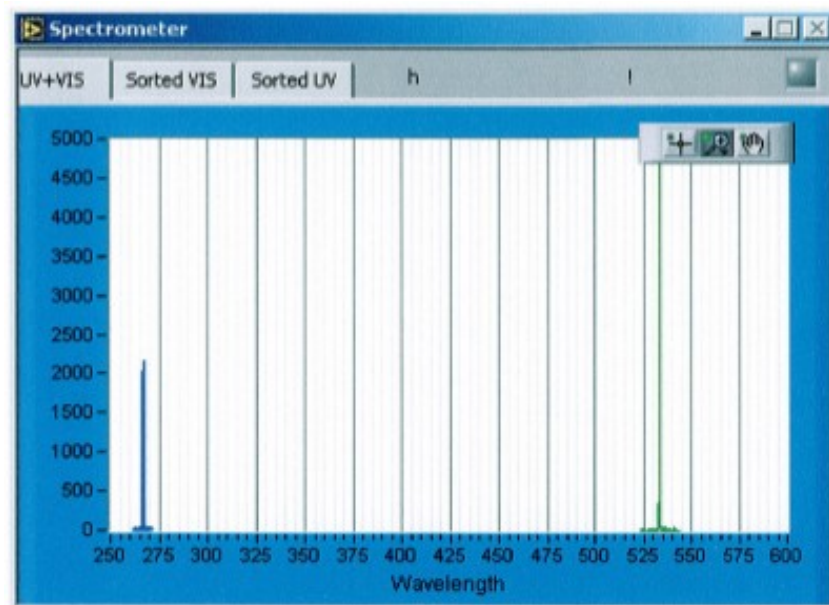


Figura 52: Datos del espectrofotómetro con intervalos reducidos de acuerdo a la secuencia.

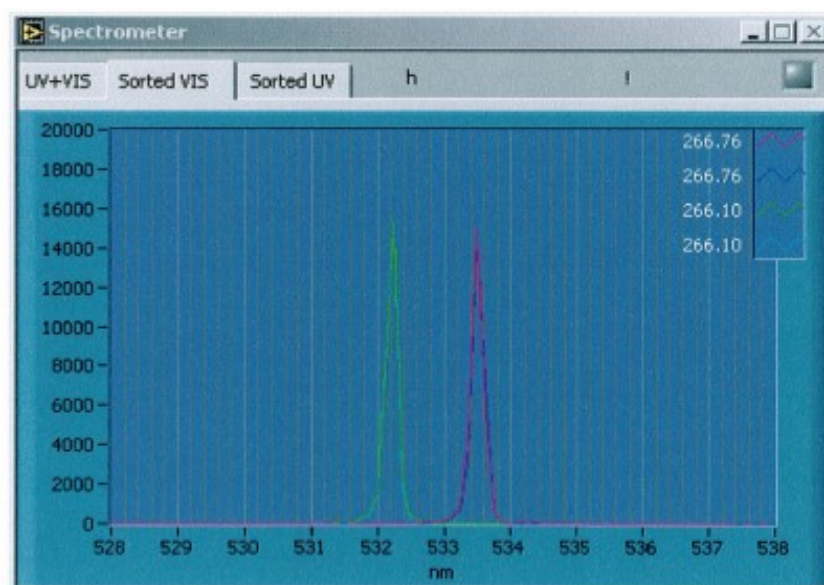


Figura 53: Espectro VIS para cada secuencia de elementos.

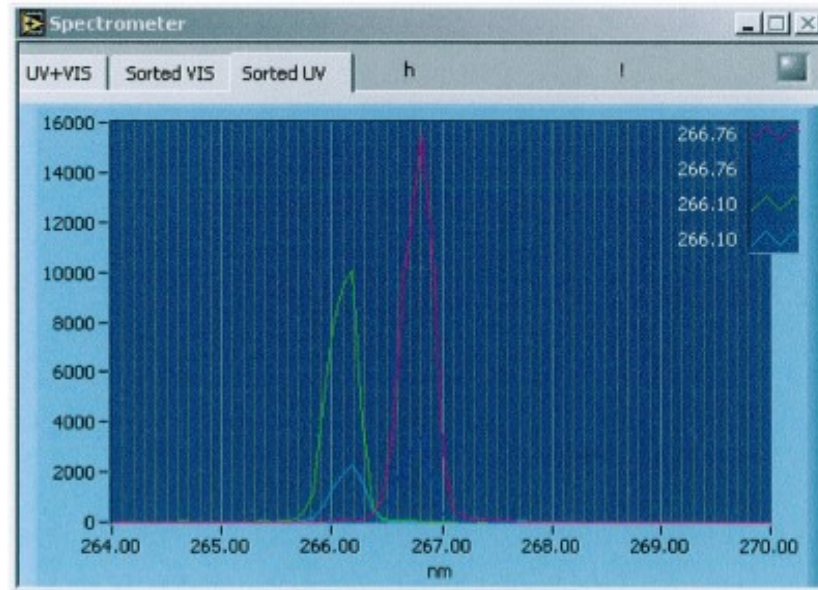


Figura 54: Intensidad de radiación UV.

3.6. PUESTA EN MARCHA DEL LÁSER

Los pasos que hay que llevar a cabo para la puesta en marcha del láser son los siguientes:

1. Una vez dentro de Laser Control, a través de la vía Access (Ver Epígrafe 3.6.1 y 3.6.2), como se observa en la figura 37, se activan los interruptores AC POWER y MAIN BREAKER, situados en la parte superior e inferior derecha del panel de interruptores, y se gira la llave en posición LASER ON. (Ver Fig. 37 y Fig. 55).



Figura 55: Detalle del panel de interruptores control de láser.

2. Cuando el software se pone en marcha, se asume que el láser está frío. De acuerdo a las recomendaciones del fabricante, el láser tendrá un calentamiento aproximado de 30 minutos con el flasheado de la lámparas. El tiempo de calentamiento puede ser interrumpido si se está seguro de que el láser está preparado y caliente para medir, si poco antes se ha realizado alguna operación con el.
3. Cuando el tiempo de calentamiento ha acabado, el láser activa automáticamente el Q-switch y abre el obturador del haz.

Por defecto, el láser operará en el programa PGM3, que es el predefinido por el fabricante. Alternativamente, puede ser seleccionado el PGM4 para reducir ligeramente la energía, PGM5 para baja energía, y PGM6 para realizar la alineación sin romper las ópticas (muy baja energía).
4. Cambiaremos a PGM6, y en el panel de interruptores de control del láser los regularemos el condensador realizando un retraso en su acumulación (DELAY ADJ - CB 632C) a 500ms (Ver Fig. 37 y Fig. 55).
5. A continuación, se comprobará la **alineación del OPO** (Oscilador Óptico Paramétrico) (Ver epígrafes 3.6.5. b y 3.9.).
6. Se realiza una medición de energía colocando el detector del medidor (Ver Fig. 56) entre la leva central de salida del haz láser (355nm) y la entrada al OPO. Una vez que el haz de luz verde de en el centro del detector, se activa el medidor de energía (Ver Fig. 57) y se comprueba la misma.

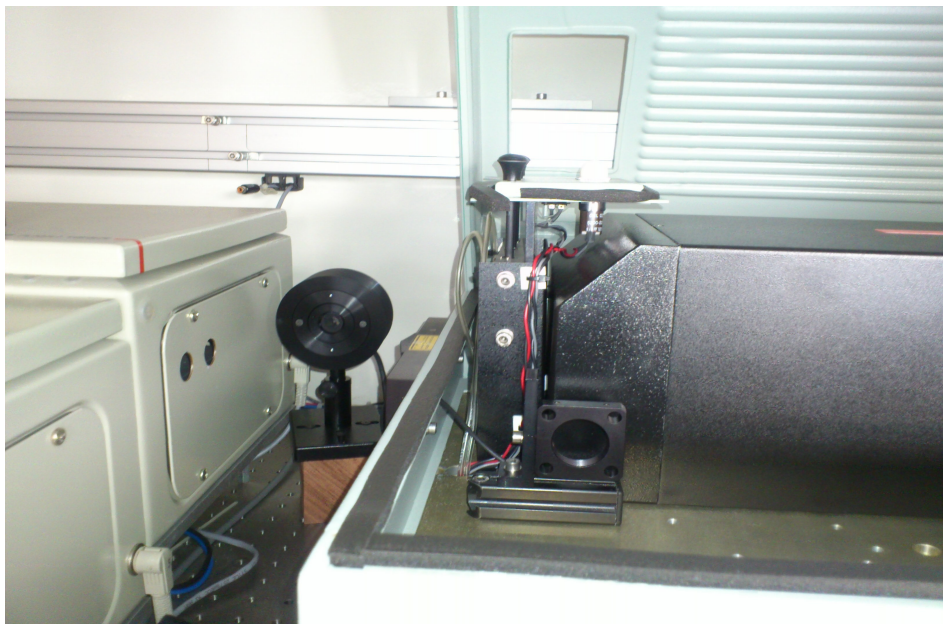


Figura 56: Detector de energía.



Figura 57: Medidor de energía.

- 7.** Se baja la leva y se cambia a PGM3 en Laser Control. Nos indicará que el Láser está activo, con *LASER ACTIVE* (Ver Fig.37), y subimos de nuevo la leva central.
- 8.** Se comprueba que el haz de luz verde sigue centrado y mucho más intenso por tanto.
- 9.** En el panel de interruptores de control del láser, el retraso se cambia en DELAY ADJ - CB 632C a 50ms (Ver Fig. 37 y Fig. 54).
- 10.** Hay que esperar a que el valor del medidor de energía se estabilice. Ese valor se estimará bueno si se encuentra entre 3,70W-3,80W. Si se da este caso, no realizaremos el punto 11.
- 11.** Se procederá a la modificación de la posición de los cristales de segundo y tercer armónico (SHG y THG), en *Crystals...Laser* (Ver Fig.38). Con esto se busca que el medidor de energía se estabilice en valores entre 3,70W-3,80W.
- 12.** Una vez que los valores buscados se estabilizaron, se procede a la calibración del OPO (Ver Epígrafe 3.6.5. b y 3.9.). una vez obtenida la gráfica correspondiente, se minimiza y se procede a;
- 13.** Calibración de SHG/SFM (Ver Epígrafe 3.6.5.c) mediante *Service...Calibrate SHG/SFM*.

3.7. PROCEDIMIENTO DE ALINEACIÓN DEL LÁSER

La correcta alineación de los componentes ópticos que conforman la cavidad del Láser constituye un delicado proceso que debe ser ejecutado muy cuidadosamente para garantizar la estabilidad y la sincronía del funcionamiento del láser.

El Láser se muestra en la figura 58: el sistema óptico de bombardeo y la cavidad láser. También se puede observar que los diferentes componentes son ajustables posicionalmente, incluido el colimador* (*sistema que a partir de un haz de luz divergente obtiene un haz paralelo) y las lentes focales.

Es importante entender que esos movimientos de ajuste deben ser muy precisos. De hecho, los haces en el cristal Nd-YAG tienen un radio de solo $70\mu\text{m}$. Para que el haz láser y el haz bombardeado coincidan, el haz bombardeado debe ser capaz de moverse en el plano perpendicular del eje óptico con una precisión de $10\mu\text{m}$.

Los espejos de la cavidad (Nd-YAG en un lado y el espejo de salida en el otro) son montados en soportes que pueden ser inclinados. Los espejos deben ser alineados con gran precisión para que las ondas Gaussianas puedan viajar hacia adelante y hacia atrás en la cavidad. Para seleccionar correctamente la posición angular del espejo de salida, el eje óptico debe cruzar la zona de bombardeo en el cristal. Esta zona es de aproximadamente $100\mu\text{m}$ por lo que el ajuste debe ser lo más cercano a $10\mu\text{m}$, ya que el espejo de salida está a unos 7cm desde el Nd-yag.

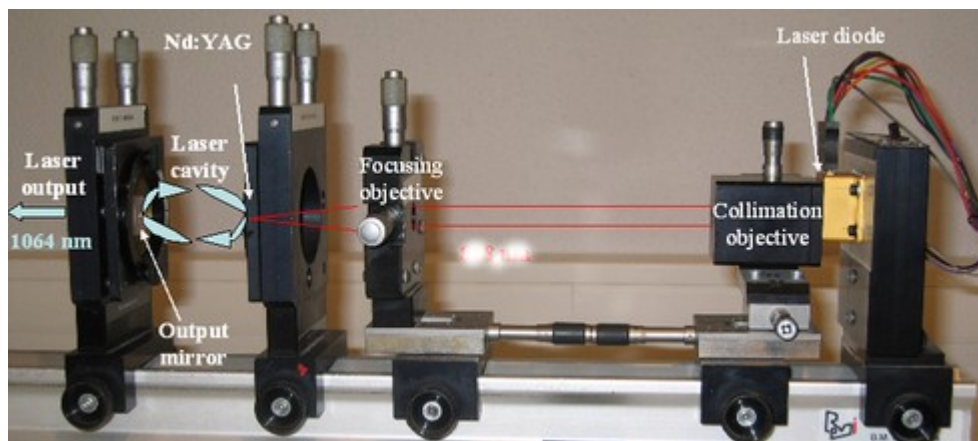


Figura 58: Componentes del láser Nd-YAG.

En la práctica, el haz bombardeado es primeramente colimatado y luego alineado paralelo a la estructura de soporte horizontal. Esto define un eje de referencia (el eje óptico), el cual debe ser usado para alinear los espejos de la cavidad óptica. A este proceso se le llama bombardeo de co-lineación donde el eje bombardeado y el eje óptico se superponen. De este modo, el haz se usa para ajustar los dos espejos

por autocolimación.

El haz bombardeado es enfocado en el cristal Nd-YAG. Por la posición del espejo de salida a una distancia más corta que la distancia crítica (igual a 100mm), el efecto del láser puede ser logrado.

Este efecto es característico de una luz intensa invisible para el ojo humano (a 1064nm) pero detectable con determinados aparatos, como los medidores de energía. Los fotones del láser que alcanzan el detector son difuminados por el espejo. No hay muchos comparado con los fotones alineados a lo largo del eje óptico, sin embargo son suficientes para crear una señal en el detector de la misma magnitud que el compartimento láser.

3.8. PROCEDIMIENTO DE ALINEACIÓN DEL OPO

El OPO debe ser alineado de la siguiente forma:

1. Poner en marcha el programa láser con bajo poder de energía (PGM6) con un Q-Switch 75 μ s.
2. Alinear el haz láser de 355nm (procedente del THG), que debe impactar en el centro del OPO. Se pueden usar los instrumentos que se muestran en las figuras 59 y 60, para alinear el OPO correctamente.

El objetivo de la alineación del OPO es que el haz entrante y la reflexión de ésta sean coincidentes.

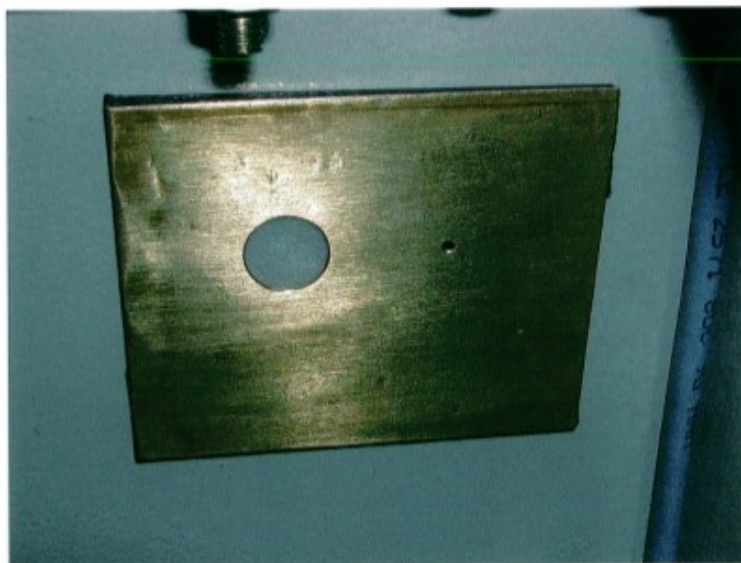


Figura 59: Detalle placa para alineación del OPO.

Para una perfecta alineación del OPO y el convertidor, el agujero/difusor debe ser usado. En la parte de atrás tiene una placa magnética para dirigir fácilmente en la salida y entrada del OPO y compartimento del convertidor.

Este agujero difusor lo utilizamos para que el haz vaya y vuelva por el mismo camino (Ver Fig 60).

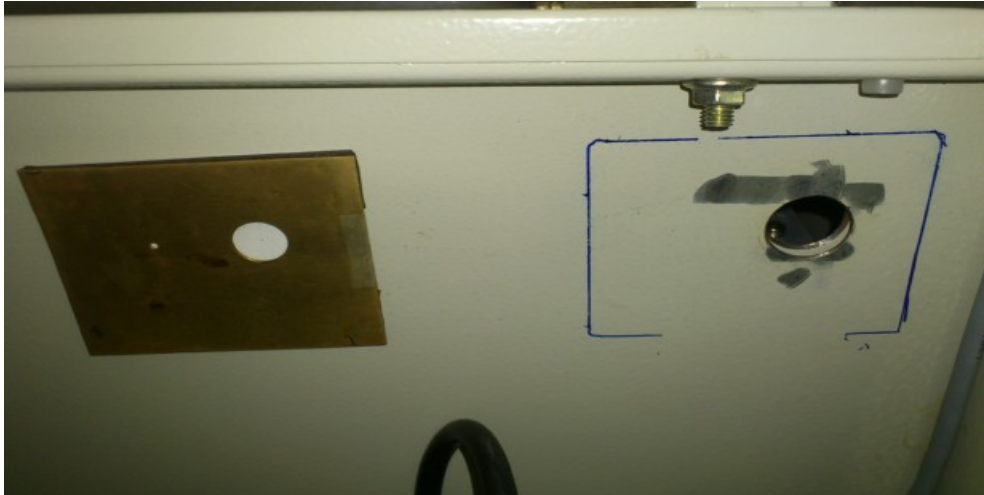


Figura 60: Detalle de la placa magnética para alineación de OPO.

3.9. PROCEDIMIENTO DE ALINEACIÓN DEL CONVERSOR

Para la alineación del convertidor se deben seguir los siguientes pasos:

- Alineación del haz visible desde el OPO. Se debería dirigir el cristal SHG en el centro y alinear el haz a través de un telescopio de corrección de astigmatismo. Se usará una pequeña parte de la luz visible redirigida desde el OPO hacia el camino UV para hacer esta alineación. Para conseguir esto se deben usar los instrumentos mostrados en las figuras 61 y 62.

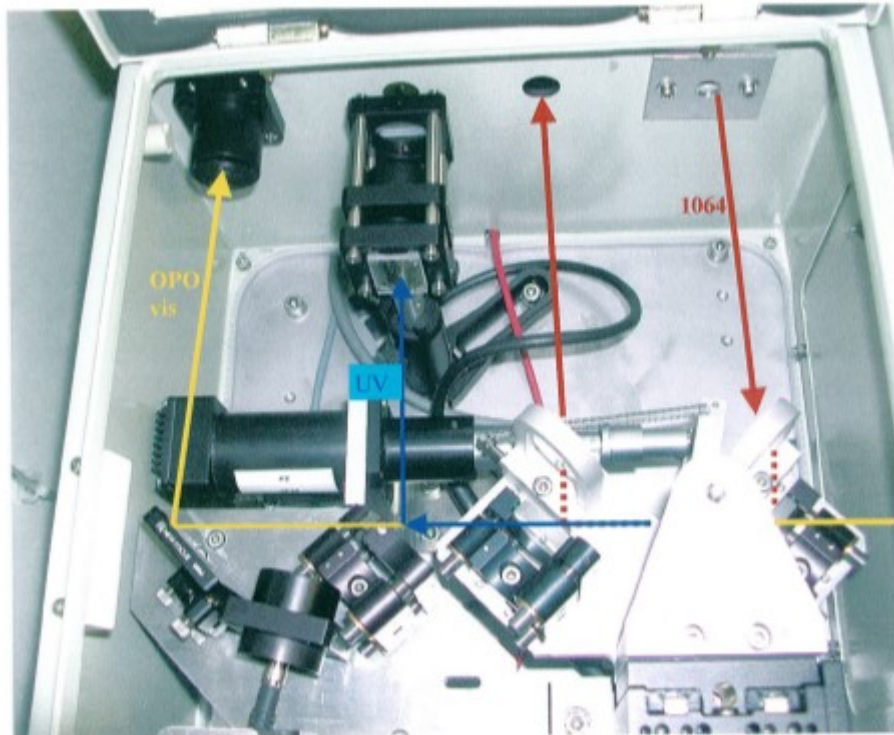


Figura 61: Detalle del Conversor.

Para lograr longitudes de onda entre 250nm y 290nm utilizamos el SHG a partir de los longitudes VIS generadas en el OPO. La radiación infrarroja residual de 1064nm es derivada usando dos espejos. Para longitudes de onda de 399nm (medida de NO_2) el haz de 1064nm se combina en el SFM (cristal situado en la parte inferior del soporte móvil, de forma triangular en la imagen) con la luz visible emitida por el OPO.

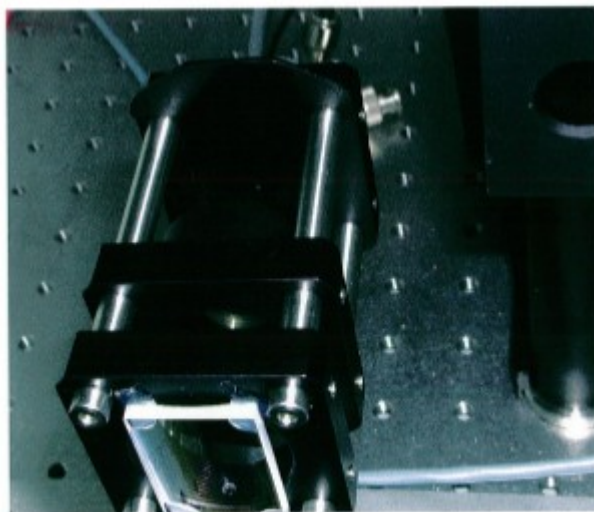


Figura 62: Telescopio de corrección de astigmatismo y agujero especial para alineación del haz UV.

3.10. MANTENIMIENTO DE LOS TORNILLOS MOTORES-MICROMÉTRICOS.

Otro punto importante es el mantenimiento de los tornillos-motores micrométricos para el buen funcionamiento tanto del OPO como del SFM (Ver Fig.63 y 64).

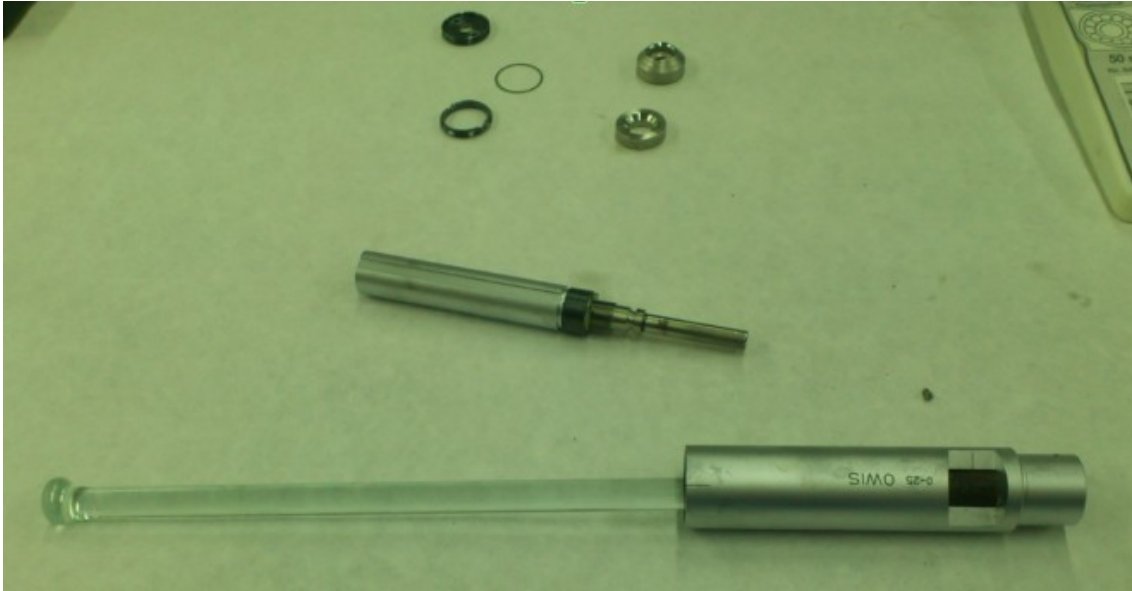


Figura 63: Detalle del mantenimiento de los tornillos-motores micrométricos.

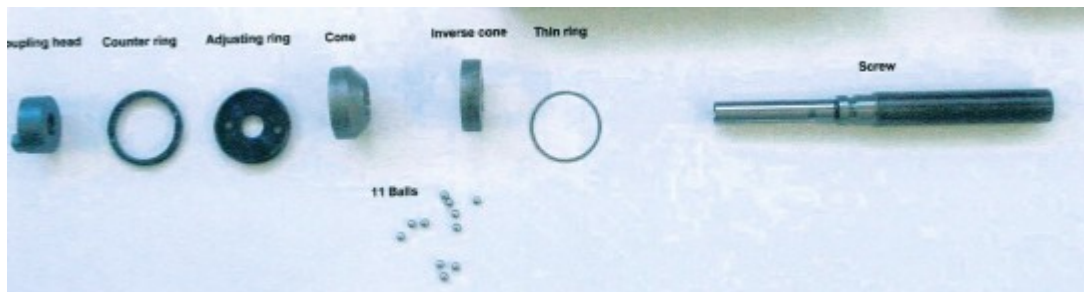


Figura 64: Detalle de las piezas interiores que componen cada tornillo-motor.

El mantenimiento de estos tornillos-motores, consiste en colocar aceite entre todas sus piezas, y montarlo de forma que su funcionamiento quede suave pero sin ningún tipo de holgura, para que pueda dirigir el OPO y SFM de forma adecuada a las posiciones estimadas por el operador del aparato.

4. CONCLUSIONES SOBRE EL USO DE LA TÉCNICA LIDAR DIAL

LIDAR es una técnica muy poderosa y selectiva, cuya principal desventaja es su costo. La tendencia más actualizada de la química atmosférica es emplear técnicas, generalmente de tipo óptico, como esta, capaces de determinar simultáneamente y en forma continua varios parámetros químicos. Dado que las moléculas de cada sustancia tienen características espectrales distintas, la espectroscopía óptica es capaz de distinguir y cuantificar los diversos componentes de la atmósfera, incluso los contaminantes.

La técnica Lidar presenta ventajas frente a otras técnicas de monitorización de la atmósfera, justificando el creciente interés y el esfuerzo continuo de mejora de los sistemas basados en ella. De hecho, la teledetección láser consiste en estudiar los constituyentes atmosféricos, entre ellos los contaminantes, de forma que no se perturba el medio observado, en el sentido de que no es necesario extraer una muestra del gas a analizar, de forma que se elimina el riesgo de modificar la muestra durante el proceso de medida. De esta forma, hoy en día, la técnica Lidar se ha convertido, en una herramienta importante para las ciencias atmosféricas debido a sus aplicaciones. Permite estudiar, entre otro, la capa límite planetaria (Matthias and Boesenberg, 2002), transporte a gran distancia (Ansmann et al., 2003), el aerosol estratosférico originado en erupciones volcánicas (Ferrare et al., 1992), propiedades físicas y ópticas de cirros (Ansmann et al., 1992 and Reichardt et al., 2002), crecimiento higroscópico de partículas de aerosol (Ferrare et al., 1998) y calidad del aire (Philbrick et al., 2002).

Por todo ello, la técnica parece de sobra adecuada para proceder al estudio y cuantificación de Dióxido de Azufre emitido por los buques en las dársenas del Puerto de Cartagena, ya que se puede llevar a cabo de forma remota haciendo barridos del área a estudio, y a su vez focalizando la cuantificación a determinados buques apuntando el láser hacia su penacho de emisión de humos de combustión.

En cuanto al objetivo práctico, es decir la propia cuantificación del contaminante objetivo (Dióxido de Azufre), la complejidad de manejo y los problemas causados en distintos módulos de funcionamiento del aparato, solamente se ha podido llegar a la puesta en marcha del láser, previamente realizando la calibración y alineación del OPO y SFM, y la alineación del propio láser. Estos procedimientos han sido costosos en cuanto a esfuerzo y dedicación debido al tiempo de inactividad que llevaba el aparato LIDAR DIAL ELIGHT UV11 de la UPCT, y la falta de asesoramiento por el fabricante o empresa externa especializada en su manejo. Todo ese esfuerzo ha recaído en la persona del tutor del proyecto y en mi persona.

La técnica LIDAR DIAL es la técnica más fiable y apropiada para hacer estos tipos de estudios y mediciones. El principal argumento es que el dióxido de azufre puede ser medido de manera bastante ajustada directamente en su penacho de emisión identificando claramente la fuente exacta de dicha emisión para, llegado el caso, el órgano administrativo correspondiente actúe de forma legal sobre ese buque en base a la legislación actual vigente. Además, la metodología está suficientemente desarrollada y se comporta de manera fiable.

En resumen, la Técnica **Differential Absorption Lidar** resulta adecuada debido a que:

- No es necesario ningún tipo de permiso del agente emisor para determinar las sustancias emitidas y en qué cantidad.
- No es necesario que el aparato de medida se encuentra situado físicamente junto al emisor. La técnica medición puede ser realizada desde varios kilómetros de distancia.
- Un único equipo puede controlar áreas grandes, como es el caso de un puerto. Controlando así todos los barcos presentes.

Las concentraciones medidas y mapeadas mediante la técnica DIAL pueden ser convertidas a concentraciones de emisiones cuando se combinan con datos meteorológicos.

La figura 65 muestra una representación espacial de la información que se puede obtener mediante las mediciones con esta técnica de las concentraciones de contaminantes en un área determinado, con es el caso del Puerto de Cartagena

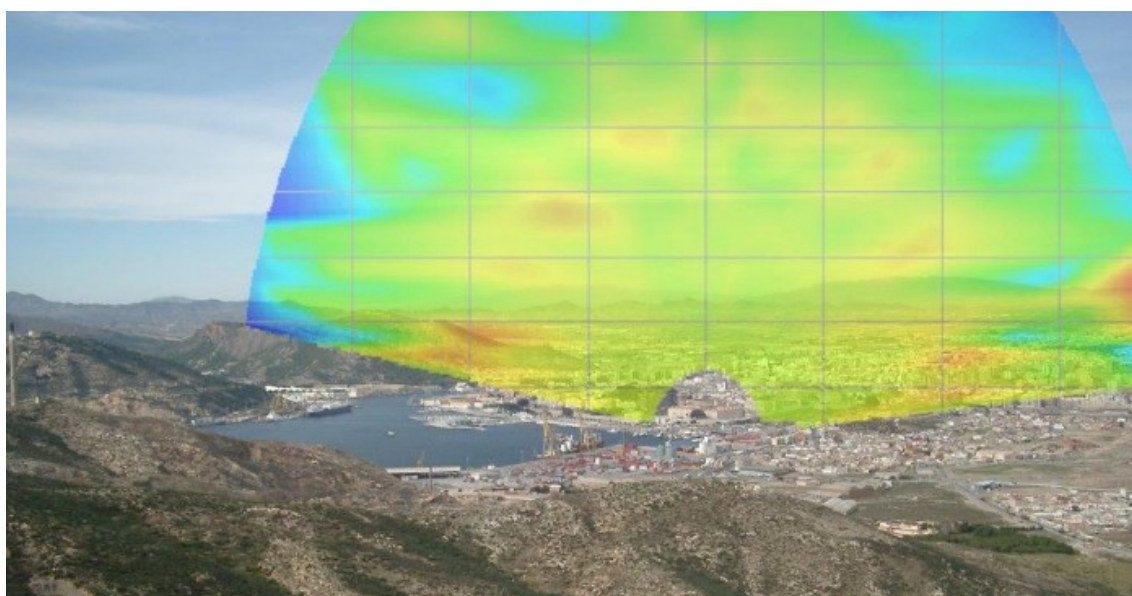


Figura 65: Representación espacial de contaminantes medidos mediante DIAL.

Además, en controles experimentales donde existe solamente una fuente de emisión en un lugar, las emisiones medidas por DIAL pueden actuar como control para servir como validación inicial para que esas emisiones sean determinadas de manera más concreta mediante otras técnicas específicas.

5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo, no hace más que establecer y describir un punto de partida en el uso de la técnica para medición de contaminantes atmosféricos emitidos de distintas fuentes puntuales, fijas y móviles. Pero cabría desarrollar futuras líneas de investigación. Dichas líneas propuestas son:

- Desarrollar de manera completa las medidas de dióxido de azufre emitido por los buques en el Puerto de Cartagena, uno de los objetivos de este trabajo.
- Medición contaminantes procedentes del transporte marítimo;
 - Cuantificar e identificar todos los barcos que transitan por la zona de estudio.
 - Estudiar las características de todos los barcos identificados (potencia y velocidad máxima).
 - Calcular la potencia total desarrollada por cada uno de los barcos.
- Medición de distintos contaminantes en el Área Industrial de Escombreras.
 - Control de fugas en distintas empresas del sector de las refinerías.
- Medición de ozono en distintas zonas de explotación agrícola en el Campo de Cartagena.

6. BIBLIOGRAFÍA

Agrawal, H., Malloy, Q.G.J., Welch, W.A., Miller, J.W., Cocker, D.R., 2008. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel. *Atmospheric Environment* 42, 5504–5510.

Aiuppa, A., Federico, C., Giudice, G., & Gurrieri, S. (2005) Chemical mapping of a fumarolic field: la Fossa crater, Vulcano Island (Aeolian Islands, Italy). *Geophysical Research Letters* 32, L13309.

European Commission and ENTEC UK Limited, 2005. Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market based Instruments Task 2b and C-NOX and SO₂ Abatement.

Corbett et al, 1999;. Endresen et al, 2003;.. Eyring et al, 2005a.